Geozentrismus und Heliozentrismus

-

eine kritische Untersuchung

Wissenschaftliche Hausarbeit

vorgelegt von

Claus-Uwe Katzenmeier

November 1994

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Suche nach dem **richtigen Weltbild**, welches unsere Beobachtungen und Experimente beschreiben soll, hat eine lange Geschichte. Schon große Persönlichkeiten wie Platon, Aristoteles und Ptolemäus haben sich damit beschäftigt und kamen damals auf verblüffend neue und bahnbrechende Ideen.

Nach einer langen Phase des schöpferischen Schlummerns erwachte die Frage nach dem richtigen Weltbild durch **neue Ideen**, die von Kopernikus veröffentlicht und vertreten wurden. Bekannte Wissenschaftler wie Galilei, Kepler, Newton und Einstein haben sich intensiv mit dieser Fragestellung auseinandergesetzt. Ein unkritisches Beharren auf dem überlieferten Weltbild führte zu Lebzeiten dieser Wissenschaftler oftmals zu einem Widerstand in der Gesellschaft gegenüber Veränderungen. Im Laufe der Zeit entwickelten sich zwei Weltsysteme, das des **Geozentrismus** und des **Heliozentrismus**. Wir werden die Entstehung dieser beiden Systeme **kritisch untersuchen**, um einen tieferen Einblick in ihre Entstehung zu gewinnen und um zu erkennen, auf welchem Fundament diese errichtet wurden.

Wir betrachten einige Experimente, die zu **neuen Theorien** führten, da der Anlaß für eine neue Theorie oftmals durch ein neues experimentelles Ergebnis gegeben wurde. Dabei werden wir unausweichlich mit der Frage der Lichtausbreitung konfrontiert, zumal die Bewegung von Planetenbahnen und Sternen durch optische Instrumente beobachtbar ist. Daher studieren wir einige Theorien, wie die spezielle Relativitätstheorie von Einstein, im Hinblick auf das Phänomen der Lichtausbreitung. Somit mündet die Suche nach dem richtigen Weltbild in die Herausforderung, die Ausbreitung von Licht mittels experimenteller Untersuchungen zu erkennen und in einer möglichst allumfassenden Theorie zu beschreiben

1.2 Zielsetzung

Es wurde deutlich, daß man die Frage nach dem richtigen Weltbild erst dann beantworten kann, wenn man die Frage nach der Lichtausbreitung beantwortet hat. Dieser

Aspekt und die Verknüpfung beider Fragestellungen - Weltbild und Lichtausbreitung - sollen in dieser Arbeit studiert werden.

Die nächsten beiden Kapitel stellen einen geschichtlichen Überblick zur Entstehung des geozentrischen und heliozentrischen Weltbildes dar, wobei dargestellt wird, daß der Unterschied der Weltbilder in der Wahl des Standpunktes begründet ist. Die großartigen Entdeckungen von Galilei, Kepler und Newton runden die historische Übersicht ab.

Im nachfolgenden Abschnitt wird gezeigt, daß die Formulierungen der Planetenbahnen von Kepler und Newton äquivalent sind und somit nur eine andere Beschreibungsweise darstellen.

Das anschließende Kapitel geht auf einige Eigenschaften und Folgerungen aus der Newtonschen Mechanik ein. Der **Begriff des Raumes und der Zeit** wird dabei untersucht und das **Newtonsche Relativitätsprinzip** formuliert.

Einige Experimente, die zur Entstehung des heutigen Weltbildes beigetragen haben, werden im sechsten Kapitel vorgestellt. Dabei werden wir die Vorstellung eines **lichtleitenden Äthers** kennenlernen, die noch im 19. Jahrhundert weit verbreitet war. Am Ende dieses Kapitels werden wir vor dem Problem des **Nulleffektes des Michelson-Morley-Interferenz-Experiments** stehen, welches ein großes Rätsel für die Wissenschaft zum Ausgang des 19. Jahrhunderts darstellte.

Daran anknüpfend betrachten wir einige Theorien, welche die vorgestellten Experimente zu beschreiben versuchen. Hierbei werden wir sowohl den Standpunkt des Geozentrismus und des Heliozentrismus einnehmen. Wir lernen zwei Theorien kennen, die an der Vorstellung eines lichtleitenden Äthers festhalten, und zwei weitere Theorien, welche die Vorstellung eines Äthers ablehnen.

Im Anschluß daran werden die vorher eingeführten Theorien kritisch beleuchtet und deren Eigenschaften sowie einige Folgerungen vorgestellt, die sich aus logischen Überlegungen ableiten lassen.

2 Astronomie der Antike und griechische Wissenschaft

Wenn man in den unbewölkten Nachthimmel schaut, so kann man zahllose Lichtpünktchen am nächtlichen Sternenhimmel erblicken. Läßt man dann den Blick umherschweifen, so ist man vor allem von der Vielfalt der Sternhelligkeit beeindruckt und weniger von dem feinen Unterschied zwischen Planeten und Fixsternen. Dieser Unterschied besteht darin, daß ein Planet nicht das bekannte Funkeln des Sternenlichtes zeigt, was schon zu manchen irreführenden Ansichten geführt hat.[1] Doch nicht nur dies läßt sich feststellen. So kann man auch erkennen, daß die Planeten in der meisten Zeit von West nach Ost wandern; "*aber zu gewissen Zeiten verlangsamen sie ihren Lauf, halten inne und gehen ein wenig zurück. Bei diesem Zurückwandern werden sie bald wieder langsamer, verharren, und schließlich setzen sie ihren Weg unter den Sternen im ursprünglichen Sinne fort.*"[2] Diese seltsame Erscheinung hat ihnen den Namen **Planeten** (griechisch: Umherschweifende) eingebracht.

Es ist interessant, was man allein schon mit dem bloßen Auge am nächtlichen Sternenhimmel erkunden kann. Diese Tatsache und der besondere, vielleicht majestätische Eindruck durch den Sternenhimmel mag den Menschen dazu geführt haben, sich etwas näher mit den Vorgängen und Abläufen unseres Sonnensystems und denen des ganzen Universums zu beschäftigen.

Es ist nicht ganz sicher, welches Volk sich zuerst mit der Astronomie beschäftigt hat. Jedoch besitzt man authentische Dokumente von den Chaldäern, die zeigen, daß Babylonien einer der ersten Mittelpunkte der Astronomie war. Zehntausende von Tontafeln sind die Zeiten hindurch unversehrt erhalten geblieben. Sie tragen Inschriften, deren älteste wahrscheinlich bis 2500 Jahre vor Christus zurückdatieren. Einige von ihnen, die von den Planeten handeln, berichten klar die Merkmale des Hin- und Zurücklaufens. Die Chaldäer sorgten sich nicht sonderlich darum, den Ursachen der astronomischen Erscheinungen auf den Grund zu gehen. Sie gaben sich vielmehr damit zufrieden, diese selbst zu beobachten und gegebenenfalls die Zeiten ihrer Wiederkehr vorherzusagen.[3]

---

[1] Dies wird erwähnt in Callatay, S. 12
[2] Callatay, S. 12
[3] Diese Angaben über die Chaldäer stammen aus Callatay, S. 13

Erst im 6. Jahrhundert vor Christus begann man sich Vorstellungen über das Weltall zu machen, die auf Erfahrungen beruhten und sich auf menschliche Vernunft gründeten. Dies verdanken wir besonders der griechischen Kultur. Daher werden wir nun einige griechischen Gelehrten betrachten, um die Ursprünge unseres heutigen Verständnisses des Sonnensystems zu erforschen.

2.1 Erste Theorien

Der ionische Philosoph **Anaximander** (610 - 546 v. Chr.) war wahrscheinlich der erste Gelehrte, der die Erde als einen Stern unter vielen anderen betrachtete, d.h. als einen im Raum schwebenden Körper. Das Himmelsgewölbe war für ihn nur die Hälfte einer Kugel, die in Wirklichkeit die Erde ganz umgab. Weiterhin stellte er sich vor, daß der Himmel mit undurchsichtigen Scheiben versehen sei, hinter denen das Feuer brenne. Diese Scheiben seien durchlöchert, so daß man die hinter ihnen verstreuten Sterne bemerken könne.[4] Diese Vorstellungen erscheinen recht naiv, jedoch muß man sich vergegenwärtigen, daß es für die damaligen Gelehrten nicht so einfach war, sich von der Mythologie und ihren übernatürlichen Vorstellungen zu befreien. Man glaubte zum Beispiel, daß die Erde von Göttern oder Elefanten getragen würde. Somit ist der Umstand, die **Erde als frei schwebend im Raum** aufzufassen, eine fortschrittliche geistige Leistung.

Im Laufe des 5. Jahrhunderts vor Christus festigte sich auch die Ansicht, daß die Erde die Gestalt einer Kugel hat. Zu dieser Ansicht scheint sich der Philosoph **Parmenides von Elea**, der von etwa 540 bis nach 480 v. Chr. gelebt hat, als erster bekannt zu haben. Dies begründete er damit, "*daß die Kugelform die einzige sei, die einen Körper im Gleichgewicht halten könne.*"[5] Er soll ebenso entdeckt haben, daß der Morgenstern und der Abendstern ein und derselbe Planet sei.

Einen weiteren Schritt weg von den Mythen unternahm **Anaxagoras** (499 - 427 v. Chr.), indem er behauptete, "*daß die Sonne durchaus nicht göttermäßig und daß Mond und Planeten nur ungeheure, in das Weltall geschleuderte Steinbrocken seien.*"[6] Dieses Verständnis war zu dieser Zeit wegen des verbreiteten Götterglaubens

[4] Die Vorstellung von Anaximander findet man in Callatay, S. 13
[5] Callatay, S. 13
[6] Callatay, S. 14

revolutionär und es wird berichtet, daß die Athener diese Theorie als skandalös betrachteten. Ebenso hatte er festgestellt, "*daß das Licht, in dem Mond und Planeten glänzen, von der Sonne herkommt. Woraus er geschlossen hat, daß diese aus feurigem Stoff bestehen müsse, während jene aus erdigem Stoff geschaffen seien.*"[7] Interessant ist hierbei, daß auch damals neuartige Theorien für großen Wirbel sorgten, sobald diese nicht in das übliche Denkschema der gelehrten Menschen paßten.

Als ein weiterer Vertreter wäre noch **Philolaos** zu nennen, der 450 bis 400 v. Chr. lebte. "*Als Schüler von Pythagoras wagte er die These, die Erde befände sich nicht im Mittelpunkt des Weltalls.*"[8] Er vertrat die Auffassung, daß die herrschenden Kräfte von einem Mittelpunkt ausgehen würden, indem sowohl die Sonne als auch die Erde nach seiner Auffassung nicht sein konnten. Damit räumte er gleichzeitig ein, daß sich die Erde ständig um diesen einzigartigen Punkt bewegen muß. Ebenso vertrat er die Auffassung, daß die Bewegung des Himmelsgewölbes nur eine scheinbare sein konnte. Jedoch wird seine geistige Eingebung dadurch getrübt, "*indem er ein System aufrichtete, das mehr noch als bei Anaximander das Übernatürliche mit nüchternen Erkenntnissen vermengte.*"[9] Seine außergewöhnliche Theorie fand wenig Beachtung und geriet daher sehr schnell in Vergessenheit.

2.2 Große griechische Philosophen

Die nun folgenden Persönlichkeiten hatten eine große Bedeutung, so daß ihre Werke die folgenden Generationen sehr stark beeinflußten und sogar noch Jahrhunderte später einen beträchtlichen Einfluß ausgeübt haben. **Platon**, der von 427 bis 347 v. Chr. lebte, war zwar kein Astronom im eigentlichen Sinne des Wortes, doch konnte er durch seine "*glänzenden und weitreichenden Geistesgaben in alle Domänen der Wissenschaft*"[10] eindringen. Nach seiner Auffassung sollte die Erde

> "*als schönstes Werk des Schöpfers keine andere als die vollkommene Form haben ... , nämlich die der Kugel. Auch mußte sie unbeweglich sein und sich im Mittelpunkt der Welt befinden. Die die Erde umwandernden Sterne mußten sich notwendigerweise in kreis- und gleichförmigen Bewegungen befinden, beides unbezweifelbare Kennzeichen der Vollkommenheit. Als weiteres Kennzeichen vollkommener Schönheit sollten die Fahrstrahlen der Planeten-Umlaufkreise zwangsläufig*

[7] Callatay, S. 14
[8] Callatay, S. 14
[9] Callatay, S. 14
[10] Callatay, S. 14

untereinander in einfachen Beziehungen stehen."[11]

Diese einfache Beziehung werden wir in ähnlicher Form später bei Kepler in einem seiner Gesetze kennenlernen. Auch die Titius-Bodesche Reihe[12] könnte als Ausdruck dieser Beziehung gesehen werden.

Ein Schüler Platons war **Eudoxos**, der von 408 bis 355 v. Chr. lebte. Er war ein schöpferischer Mathematiker und wurde beauftragt, das Problem der Planetenbewegung zu lösen. Dabei sollte er nur vollkommene Bewegungen in Betracht ziehen, so wie dies sein Lehrmeister vertreten hatte. Diesen Vorgaben fügte Eudoxos als eine weitere hinzu,

"*daß sich die gleichförmigen Kreisbewegungen der Planeten um die Erde als Mittelpunkt zu vollziehen hätten. Die Lösung dieses Problems ist ein Musterbeispiel von Genialität und ein Meisterwerk der Geometrie. Alle Sterne gehören nach ihm fest einer Kugelfläche an oder allgemeiner einer Gruppe von Kugelflächen, die ineinandergefügt sind wie die Teile einer kardanischen Aufhängung. Jede Sphäre hat eine eigene Umdrehungsgeschwindigkeit; im ganzen gibt es nach Eudoxos 27, die sich wie folgt verteilen: eine Fixsternsphäre, drei für den Mond, ebensoviele für die Sonne und je vier für die fünf* [damals bekannten] *Planeten.*"[13]

Bemerkenswert ist, daß seine Theorie die Bewegung von Merkur, Jupiter und Saturn erklären konnte, jedoch für Venus zu ungenau war und für Mars gänzlich versagte. Ein weiterer Mangel dieser Theorie war, daß sie die Helligkeitsänderungen der bis dahin bekannten Planeten nicht erklären konnte.

Ein weiterer Philosoph war **Aristoteles**, der von 384 bis 322 v. Chr. lebte. Ebenso wie Platon war er mehr Philosoph als Astronom, doch hatte auch er eine so umfassende Begabung, daß er sich jedem Zweig der Wissenschaft widmen konnte.

"*Seine Philosophie war nach verschiedenen Grundregeln ausgerichtet. In der Hauptsache war sie realistisch und ging deshalb von dem Grundsatz aus, daß sich Wissen nur auf konkrete Tatsachen gründen darf. Die Hauptrolle wies er dabei der Beobachtung der Naturerscheinungen und dem anschließenden Versuch zu.*"[14]

---

[11] Callatay, S. 14

[12] Eine Zahlenreihe, die den Abstand der Planeten, bis auf einige Ausnahmen, in unserem Sonnensystem durch eine einfache Vorschrift ziemlich genau beschreibt. Nachzulesen in: Callatay, S. 23

[13] Callatay, S. 14

[14] Callatay, S. 14

Somit kann er als ein Begründer der modernen Wissenschaft gesehen werden. In Be zug auf die Theorie von Eudoxos erhöhte er die Anzahl der Sphären von 27 auf nur mehr insgesamt 55, um die Gesamtheit mechanisch vertretbar zu gestalten.

Der letzte große Astronom des 4. Jahrhunderts war **Herakleides von Pontos**, de von 388 bis 315 v. Chr. lebte. Er "*lehrte als erster, daß sich die Erde um ihre Achs drehe. Angeblich hat er auch als erster die Hypothese aufgestellt, daß der Planet Ve nus sich nicht um die Erde, sondern um die Sonne bewegt.*"[15]

Als letzter Vertreter der charakteristischen Epoche der Alten Geschichte, in wel cher Athen als Mittelpunkt der Wissenschaft galt, sei **Aristarch von Samos** noch er wähnt, der im 3. Jahrhundert vor Christus lebte. Leider erfährt man die Bedeutung seines Werkes nur durch einen seiner Kommentatoren, nämlich durch **Archimedes** Aristarch betrachtete die Sonne und die Sterne als stillstehend und nahm an, daß die Erde im Laufe eines Jahres einmal um die Sonne kreist.

"*Außerdem erklärte er ... den unveränderlichen Sternenhimmel während des jährlichen Umlaufs der Erde um die Sonne, indem er genau darauf hinwies, daß die Größe des Erdbahndurchmessers zu vernachlässigen ist im Vergleich zur Entfernung der Fixsterne. Nach Plutarch hat Aristarch auch die tägliche Umdrehung der Erde um sich selbst erkannt, und diese ebenso revolutionäre Entdeckung hätte ihm beinahe eine Verurteilung wegen Gottlosigkeit eingebracht. ... Nach wie vor ging er von der Voraussetzung aus, die Planetenbahnen seien kreisförmig. ... Aristarch hätte leicht diese Fehler verbessern können, hätte er elliptische Bahnen an die Stelle der kreisförmigen gesetzt; jedoch wäre er dann genötigt gewesen, Platon und Aristoteles zu verleugnen.*"[16]

2.3 Alexandrinische Wissenschaft und Claudius Ptolemäus

Die Zeit von Aristarchs Wirken ist durch den beginnenden Niedergang des bisherigen Mittelpunkts der Wissenschaften gekennzeichnet. Mit dem Niedergang Athens als Wissenschaftsmetropole beginnt der Aufstieg eines neuen geistigen Zentrums: Alexandrien in Ägypten zog immer mehr Gelehrte an. Somit lag es nun an dieser Stadt, die Wissenschaft zu fördern.

"*Der Fortschritt trat besonders in den Rechenmethoden und im Meßwesen zutage, denn dank der Arbeitsmethoden, die mehr und mehr mathematischen Charakter annahmen, und dank der Fortschritte, die durch Vervollkommnung der*

[15] Callatay, S. 15
[16] Callatay, S. 15

Beobachtungsinstrumente herbeigeführt wurden, gewannen die Ergebnisse an Genauigkeit."[17]

Von den Gelehrten in Alexandrien sind besonders drei von Interesse: **Apollonios von Perge** (etwa 265 - 170 v. Chr.), **Hipparch von Nicaea** (etwa 190 - 125 v. Chr.) und **Claudius Ptolemäus**, der in der Zeit von 127 bis 151 n. Chr. wirkte. Diese drei Astronomen haben sich mit dem gleichen Problem befaßt, jedoch hat Ptolemäus als einziger Schriften über seine Arbeit hinterlassen. Diese Berichte und Erläuterungen mehrerer zeitgenössischer Geschichtsschreiber gestatten heute die Vermutung, daß unter den drei Astronomen Hipparch als der genialste Geist gilt. Eine der Hauptaufgaben für Aristarchs Nachfolger war, eine Hypothese zu finden, die in Einklang mit dem geozentrischen Weltbild die Helligkeitsunterschiede der Planeten während ihres Umlaufs um die Sonne zu erklären vermochte.[18] Auch hierbei sollte wieder von dem Grundsatz ausgegangen werden, daß sich die Bahnen nur aus kreisförmigen und gleichmäßigen Bewegungen und höchstenfalls davon abgeleiteten Kombinationen zusammensetzen.

"*Aus diesen Annahmen und Grundsätzen kam eine ganz neue Theorie zustande, nämlich die der Epizykloiden mit der Variante der Exzenter, die mathematisch einander gleichwertig sind. ... Obwohl hinreißend durch ihre Genialität, läßt sich diese Theorie der Epizykloiden in wenigen Worten zusammenfassen. Sie setzt voraus, daß die Bewegung eines Planeten das Ergebnis zweier Kreisbewegungen ist. ...* [Es] *wird angenommen, daß sich der Planet auf dem Umfang eines Kreises bewegt, dessen Mittelpunkt selbst den Umfang eines Kreises, des **Deferenten**, beschreibt, wobei sich diese beiden Bewegungen im gleichen Sinne vollziehen. Die daraus folgende Bahn wird **Epizykloide** genannt."*[19]

Dies ist nichts anderes als eine Zykloide, die nicht auf einer Geraden abgerollt wird, sondern auf einem Kreis. Dies kann man sich am besten durch die Abbildung 1 klar machen.

"*Claudius Ptolemäus hatte das Glück, alle Ergebnisse astronomischer Beobachtungen zu erben, die während der aufblühenden Zeit von beiläufig 250 Jahren, die ihn von Hipparch trennten, gemacht worden waren. ... Meist zu hoch eingeschätzt, muß von Ptolemäus gesagt werden, daß seine Werke gar nicht das Ergebnis eigener Arbeit sind. Sein Sternkatalog ist praktisch derselbe wie der Hipparchs, und sein Planetensystem gibt nur das des Gelehrten von Rhodos wieder - mit wenigen Ausnahmen. Dennoch gilt Ptolemäus als einer der drei großen Astronomen des Altertums."*[20]

[17] Callatay, S. 15
[18] Diese Informationen findet man in Callatay, S. 15
[19] Callatay, S. 15-16
[20] Callatay, S. 17

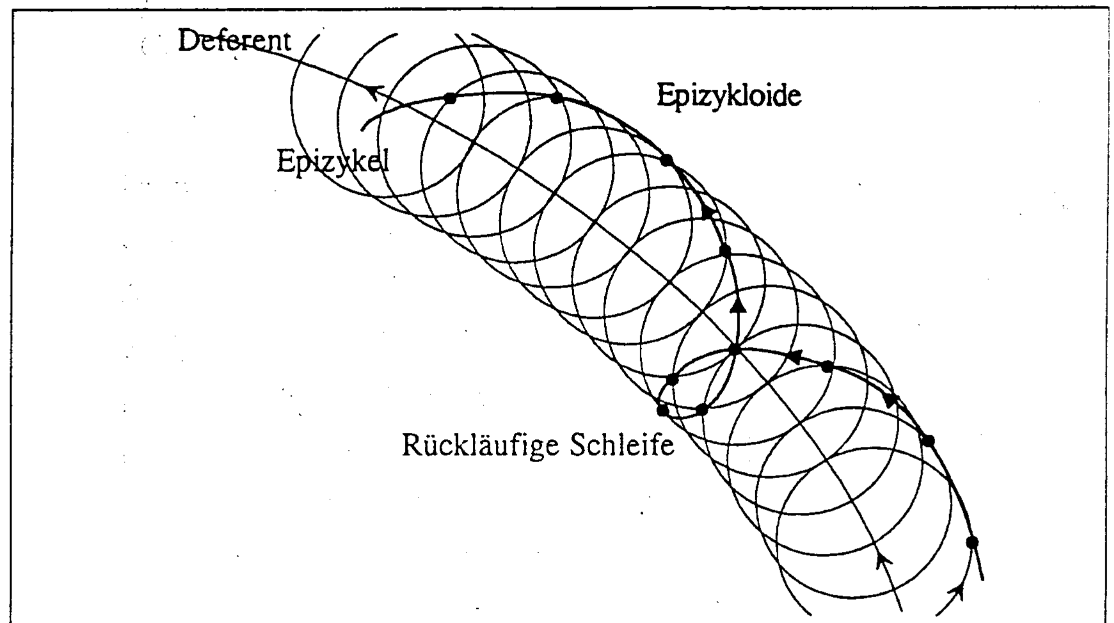


Abbildung 1 Deferent, Epizykel und die daraus resultierende Epizykloide[21]

Noch heute wird das geozentrische Weltbild manchmal nach ihm benannt, man nennt es das **Ptolemäische Weltbild**.

Dem Ptolemäischen System liegen vier Postulate zugrunde:[22]

1. Die Erde ist im Zentrum des Universums (nicht im Zentrum unseres Sonnensystems!).

2. Die Erde befindet sich in Ruhe.

3. Alle Himmelskörper bewegen sich um die Erde.

4. Die Bewegung der Himmelskörper vollzieht sich in Kreisen mit konstanter Geschwindigkeit, d. h. gleichförmig.

Ptolemäus gründete sein System auf die Epizyklen von Hipparch, wobei er bei den Planeten mehrere Epizyklen ineinanderschachtelte. Dabei war der Deferent Schwerpunkt eines sich daran anschließenden ersten Epizykels. Dieser erste Epizykel wiederum war Schwerpunkt eines zweiten Epizykels und so weiter.

---

[21] Frei gezeichnet nach Callatay, S. 16, Abb. 2
[22] Eine Auflistung der 4 Punkte findet man in Solovyov, S. 16

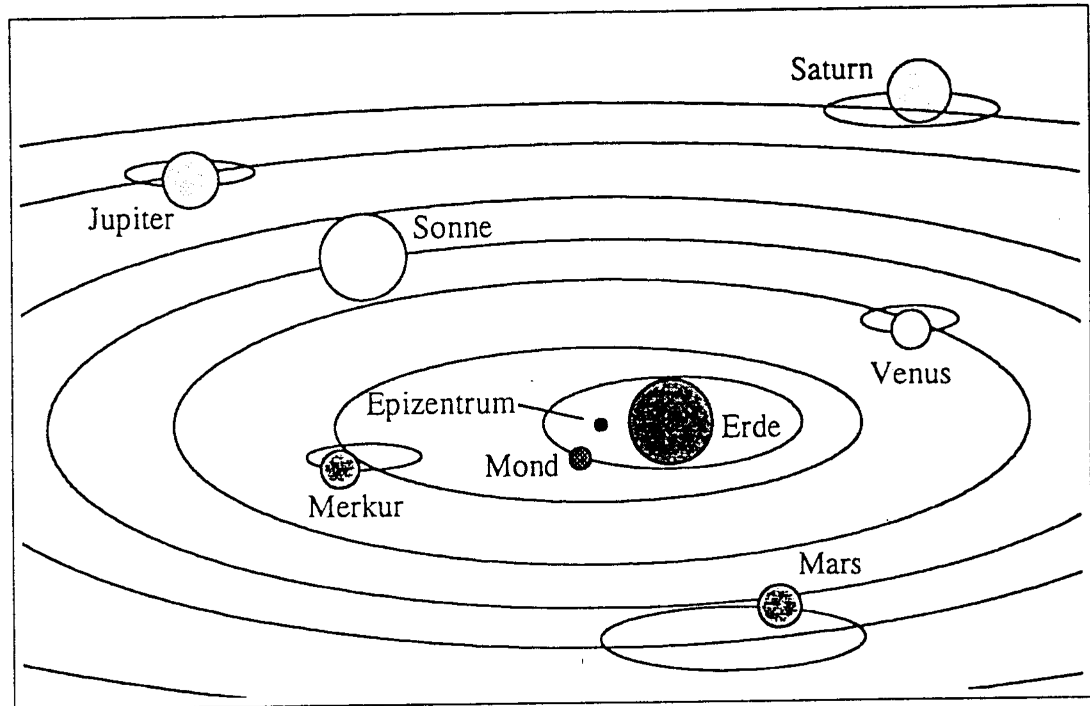


Abbildung 2 Prinzipieller Aufbau des Ptolemäischen Weltbildes

Die Schwerpunkte der Deferenten liegen jedoch nicht in der stationären Erde, sondern leicht verschoben davon im **Epizentrum**, wodurch sich eine exzentrische Bahn ergibt (siehe Abbildung 2). Die Bahnbewegung der Sonne verläuft auf einem Kreis, wobei der Kreismittelpunkt ebenso im Epizentrum liegt, womit man auch hier eine exzentrische Bahn erhält, um die verschiedenen Längen der Jahreszeiten erklären zu können.[23]

In der Folgezeit wurden immer wieder weitere Epizykel hinzugefügt, um neuere und genauere Beobachtungen dem Ptolemäischen System anzupassen.

*"Ein moderner Naturwissenschaftler würde hier von einer Expansion der beobachteten Kreisbewegungen in Fouriersche Reihen sprechen. Der französische Mathematiker **J. B. Fourier** zeigte zu Anfang des 19. Jahrhunderts, daß jede regelmäßige periodische Bewegung als eine Überlagerung gleichförmiger Kreisbewegungen einer vielleicht unendlichen Zahl gedeutet werden kann."*[24]

Solovyov schreibt, daß das Ptolemäische System am Anfang des 16. Jahrhunderts im ganzen 40 Zyklen beinhaltete.[25]

[23] Diese Erläuterungen findet man in Solovyov, S. 16-17
[24] Bernstein, S. 29, Hervorhebung selbst eingefügt
[25] Nachzulesen in Solovyov, S. 17

2.4 Zusammenfassung

Die Entstehung von Weltbildern können wir durch schriftlich gesicherte Überlieferu gen bis zu den Griechen zurückverfolgen. Die griechischen Philosophen gaben daf die stärksten Impulse, die danach von anderen Gelehrten übernommen und ausgeba wurden. Die Entmythologisierung der Weltbildvorstellungen und die Einführung ne er Rechen- und Arbeitsmethoden waren dabei wesentliche Komponenten für eine **wissenschaftlichen Fortschritt**. Die Einführung der berechnenden Mathematik wu de in diesem Zusammenhang erst von der alexandrinischen Wissenschaft vorang bracht, da diese Art Handarbeit bei den Griechen nicht angesehen war. Auf dieser B sis stellte Ptolemäus sein als **Ptolemäisches Weltbild** bekanntes Weltsystem auf.

3 Beginn der modernen Astronomie

3.1 Nikolaus Kopernikus

Nach mehr als einem Jahrtausend Stillstand in der Weiterentwicklung der astronomischen Wissenschaft, wurde die wissenschaftliche Welt im Jahre 1532 durch die **Ankündigung eines Werkes aufgeschreckt**, welches den Titel "De Revolutionibus Orbium Coelestium" trug und von **Nikolaus Kopernikus** (1473-1543) verfaßt wurde. Jedoch gab man es erst 1543 heraus, was oft so ausgelegt wurde, daß er "*aus Furcht vor den ihm drohenden Reaktionen bis zu seinem Lebensabend gewartet* [habe], *um erst dann sein Buch der Öffentlichkeit zu übergeben.*"[26] Er war ein entschiedener Gegner des geozentrischen Weltbildes, was zur damaligen Zeit nicht im Sinne der Amtskirche war. Das **Kopernikanische Weltbild** (siehe Abbildung 3) ist nicht so einfach, wie man es sich üblicherweise vorstellt: die Sonne befinde sich im Zentrum und die Planeten würden sich in kreisförmigen und konzentrischen Bahnen um diese bewegen. Auch Kopernikus ist dem aristotelischen Denken in dem Sinne treu geblieben, daß "*er glaubte, sich an die kreisförmigen Bahnen halten zu müssen. Aber bei dem Versuch, die bei Annahme jener falschen Bahnform unvermeidlichen Widersprüche zu erklären, fand er auch kein anderes Ergebnis als die Notlösung der alexandrinischen Schule*"[27] (die Epizykel-Lösung). Man ist sich in diesem Punkt in der Literatur nicht ganz einig, ob nun das Kopernikanische Weltbild mehr oder weniger Epizyklen benötigte oder nicht. **George Pólya** schreibt dazu, daß "*sich Kopernikus damit begnügte zu zeigen, daß eine heliozentrische Hypothese besser als eine geozentrische funktioniert: sie benötigt weniger Epizyklen.*"[28] Im Gegensatz dazu bemerkt **Otto Neugebauer**, daß "*der volkstümliche Glaube, das heliozentrische System von Kopernikus beinhalte eine Vereinfachung gegenüber des ptolemäischen Systems, offensichtlich falsch ist. ... Das Kopernikanische Modell benötigt selbst etwa doppelt soviele Zyklen wie das Ptolemäische System.*"[29] Auch **Yury Solovyov** erwähnt, daß das Kopernikanische System 48 Zyklen, das Ptolemäische aber nur 40 Zyklen benötigt

---

26 Callatay, S. 20
27 Callatay, S. 20
28 "He contented himself with showing that a heliocentric hypotheseis works better than a geocentric one: it requires fewer epicycles", Pólya, Mathematical Methods in Science, S. 18
29 "The popular belief that Copernicus' heliocentric system constitutes a simplification of the Ptolemaic system is obviously wrong. ... The Copernican models themselves require about twice as many circles as the Ptolemaic models", Neugebauer, S. 65

hätte.[30] Da ebenso **Vincent de Callatay** von einer Notlösung spricht, kann man wohl annehmen, daß das Kopernikanische Weltbild in diesem Punkt keinen Fortschritt gebracht hat.

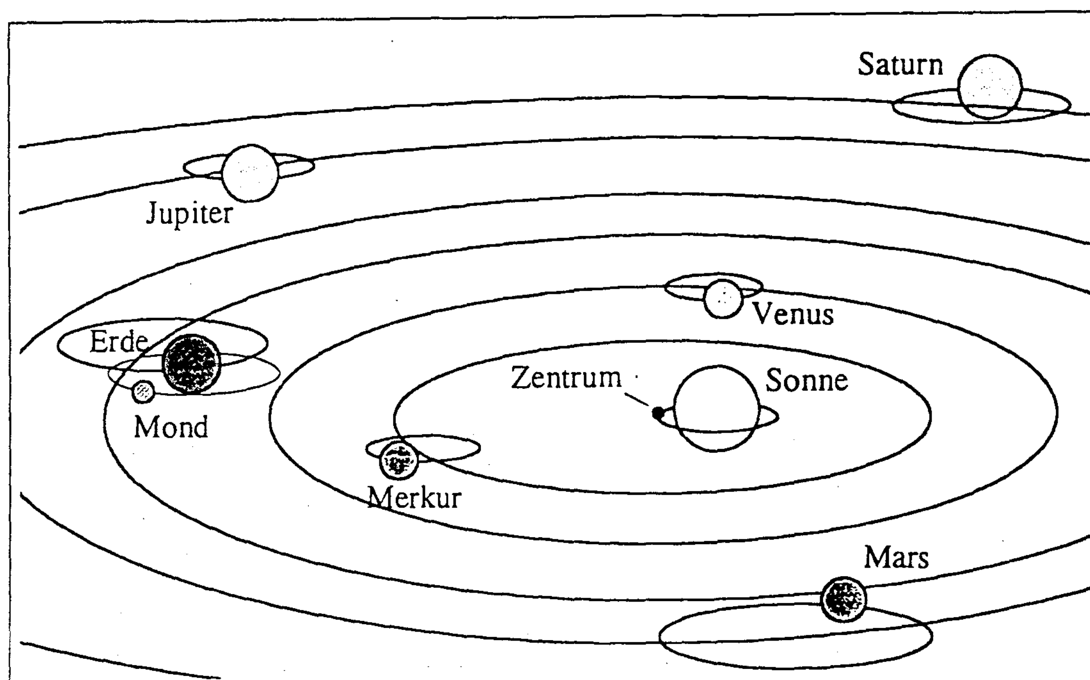


Abbildung 3 Prinzipieller Aufbau des Kopernikanischen Weltbildes

Kopernikus stellte sich vor, daß es in unserem Sonnensystem einen Punkt gibt, der als Mittelpunkt aller Planetenbahnen fungiert. "*Dieser Ort ist also auch Mittelpunkt der Erdbahn, jedoch keineswegs der Ort der Sonne. Jenes gemeinsame Zentrum umwandert unser Tagesgestirn, und die entstehende Bahn ist nichts anderes als eine Epizykloide, ähnlich der bei Hipparch.*"[31] Demnach befindet sich die Sonne im Kopernikanischen Weltbild recht nahe am Zentrum, ist aber selbst nicht im Zentrum plaziert. Man könnte sich hier auch vorstellen, daß Kopernikus mit dem gemeinsamen Mittelpunkt, der relativ zur Sonne wandert, so etwas wie den Schwerpunkt unseres Sonnensystems gemeint haben könnte. Leider wird sein vermutlich physikalisches Verständnis aus heutiger Sicht dadurch getrübt, daß er sich vorstellte, die Erde würde ihre Bahn wie eine an einem Faden aufgehängte Kugel beschreiben, siehe Abbildung 4. Deshalb dachte er, daß die Nord-Süd-Achse der Erde einen Kegel umschreiben würde. "*Da diese Bewegung nicht den Beobachtungen entsprach, hatte er geschlossen, daß unsere Erde von einer Gegenbewegung angeregt sei, durch welche die Schwingung ausgeglichen werde, die er zum Nachteil seiner Theorie erfunden hatte.*"[32] Es besteht

[30] Dies findet man in Solovyov, S. 18
[31] Callatay, S. 20

jedoch kein Zweifel, daß das **System von Kopernikus ein Vorläufer des heliozentrischen Weltbildes** ist und er mit seinem Kopernikanischen Weltbild diesem schon sehr nahe gekommen ist.

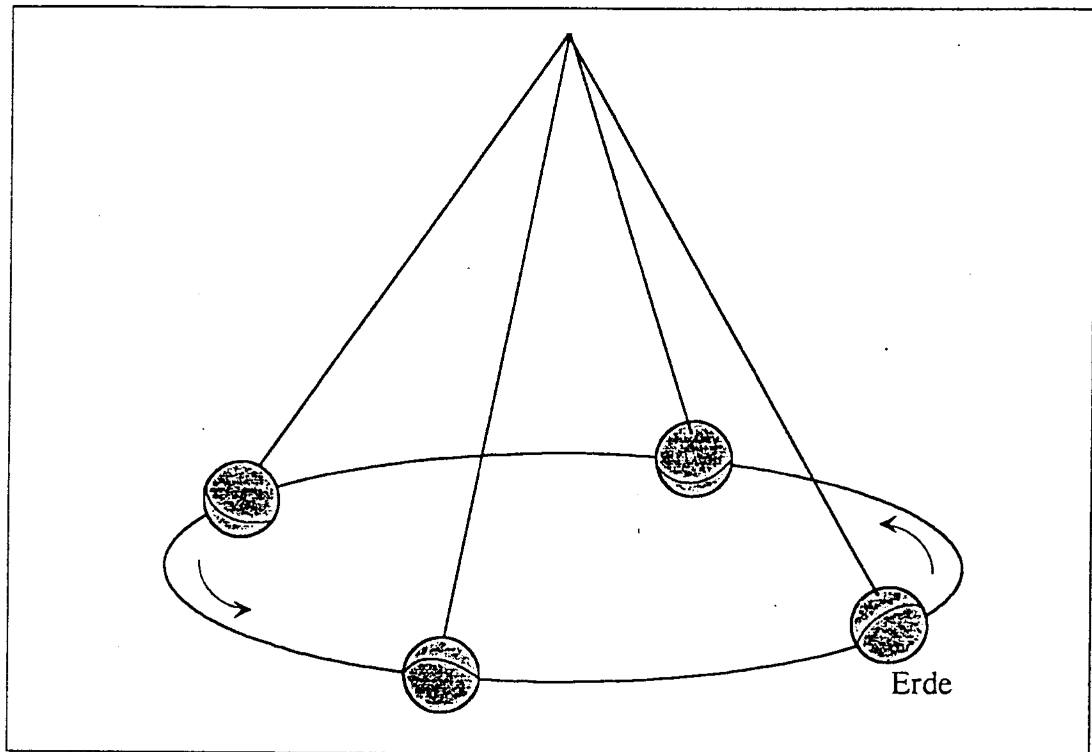


Abbildung 4 Pendelbewegung der Erde nach einer Vorstellung von Kopernikus[33]

3.2 Tycho Brahe

Tycho Brahe (1546-1601) ist bekannt als ein Astronom, der während seiner langen Laufbahn mit überraschender Genauigkeit eine große Anzahl von Planetenorten aufzeichnete. Dies war ihm unter anderem auch dadurch möglich, da er die **alten Beobachtungsinstrumente vervollkommnete** und auch einige neue schuf. Damit legte er auch den Grundstein für eine Theorie, die aus den Beobachtungen erfolgen sollte, wobei er selbst weder Anhänger des Kopernikanischen noch Vertreter des Ptolemäischen Weltbildes war. Da er beide nicht billigte, erarbeitete er sich selbst ein Weltbild (siehe Abbildung 5), "*ohne daran zu zweifeln, daß dieses nur eine mathematische Umarbeitung von Kopernikus' Theorie sein konnte.*"[34] Für Brahe stand die **Erde unbeweglich im Mittelpunkt des Weltalls, Sonne und Mond umlaufen die Erde**, wobei die

[32] Callatay, S. 20-21
[33] Frei nachgezeichnet aus Callatay, S. 21, Abb. 6
[34] Callatay, S. 21

anderen Planeten die Sonne umkreisen und gleichzeitig den Lauf der Sonne um die Erde mitmachen.

> *"In der Tat ist es eine relative Frage, d.h.* ***eine Frage des Bezugspunktes****, ob man annimmt, daß sich die Sonne wie auch das Himmelsgewölbe um die Erde drehen oder ob man im Gegenteil die Erde die Umdrehung ausführen läßt. Der Mathematiker stellt die eine Hypothese ebenso korrekt dar wie die andere, und die Lösungen beider sind nicht nur richtig, sondern auch* ***gleichwertig****."*[35]

Dies ist eine interessante Aussage. Daher werden wir im folgenden Kapitel diese Gleichwertigkeit der Beschreibung betrachten, indem wir die Bewegungen vom Ptolemäischen System in das Kopernikanische System transformieren. Danach bleibt hierbei nur noch die Frage zu klären, welcher physikalische Unterschied beide Systeme voneinander trennt. Diese Frage werden wir später untersuchen, sobald wir die Physik zu diesem Problem erarbeitet haben.

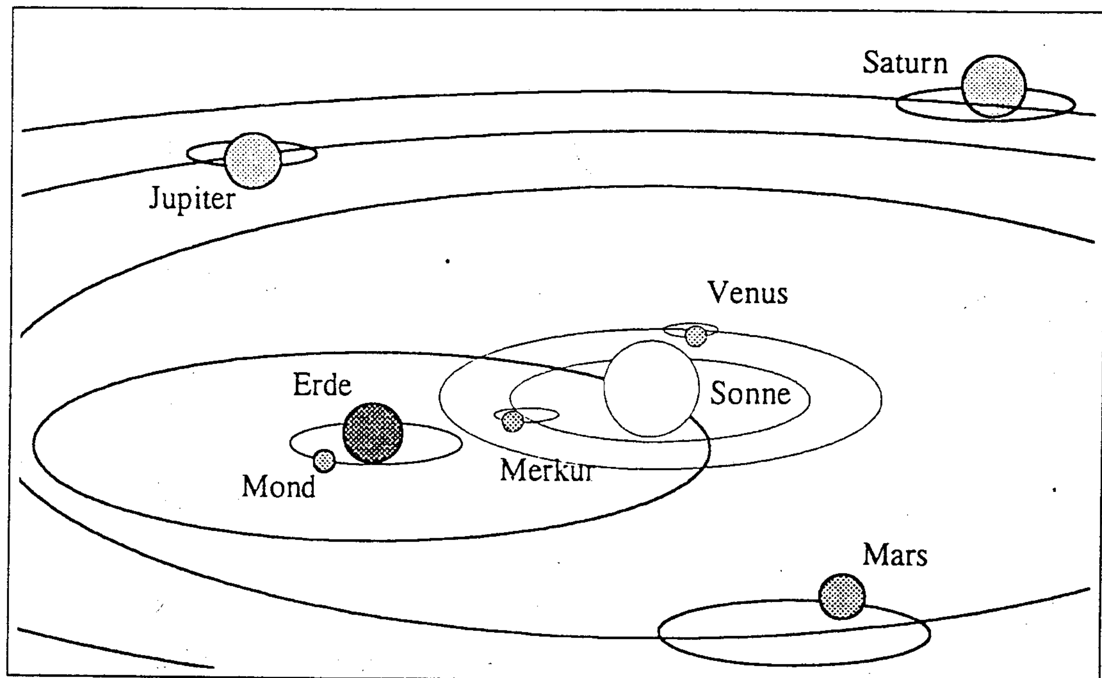


Abbildung 5 Prinzipieller Aufbau des Weltbildes von Brahe

3.3 Vom Ptolemäischen zum Kopernikanischen System

Den **Übergang vom Ptolemäischen zum Kopernikanischen System** werden wir nun durch einen **Wechsel des Standpunktes** von der Erde zur Sonne erreichen.[36]

[35] Callatay, S. 21 (Hervorhebungen selbst eingefügt)
[36] Eine Abhandlung darüber findet man in Rutherford et al., S. 36-37

Physikalische Aspekte, wie Schwerpunktsbewegung und ähnliches, schließen wir bei der Betrachtung aus.

Der Standpunktwechsel vom Ptolemäischen zum Kopernikanischen System ist nichts anderes als ein Wechsel des Bezugssystems. Die sichtbaren Bewegungen, vorher den Deferenten und Epizykloiden zugeschrieben, wurden durch Kopernikus der Erdbahn und den Planetenbahnen um die Sonne zugeordnet.

Betrachten wir uns zum Beispiel die Bewegung der Venus. Im Ptolemäischen System ist das Zentrum des Epizykels der Venus an die Bewegung der Sonne gekoppelt. Der Radius des Deferenten der Venus ist gemäß Ptolemäus kleiner als der des Deferenten der Sonne. Der Epizykel der Venus ist dabei stets zwischen Erde und Sonne plaziert. Die beobachteten Bewegungen der Planeten erfordern nur ein bestimmtes Verhältnis zwischen Epizykel- und Deferentengröße.

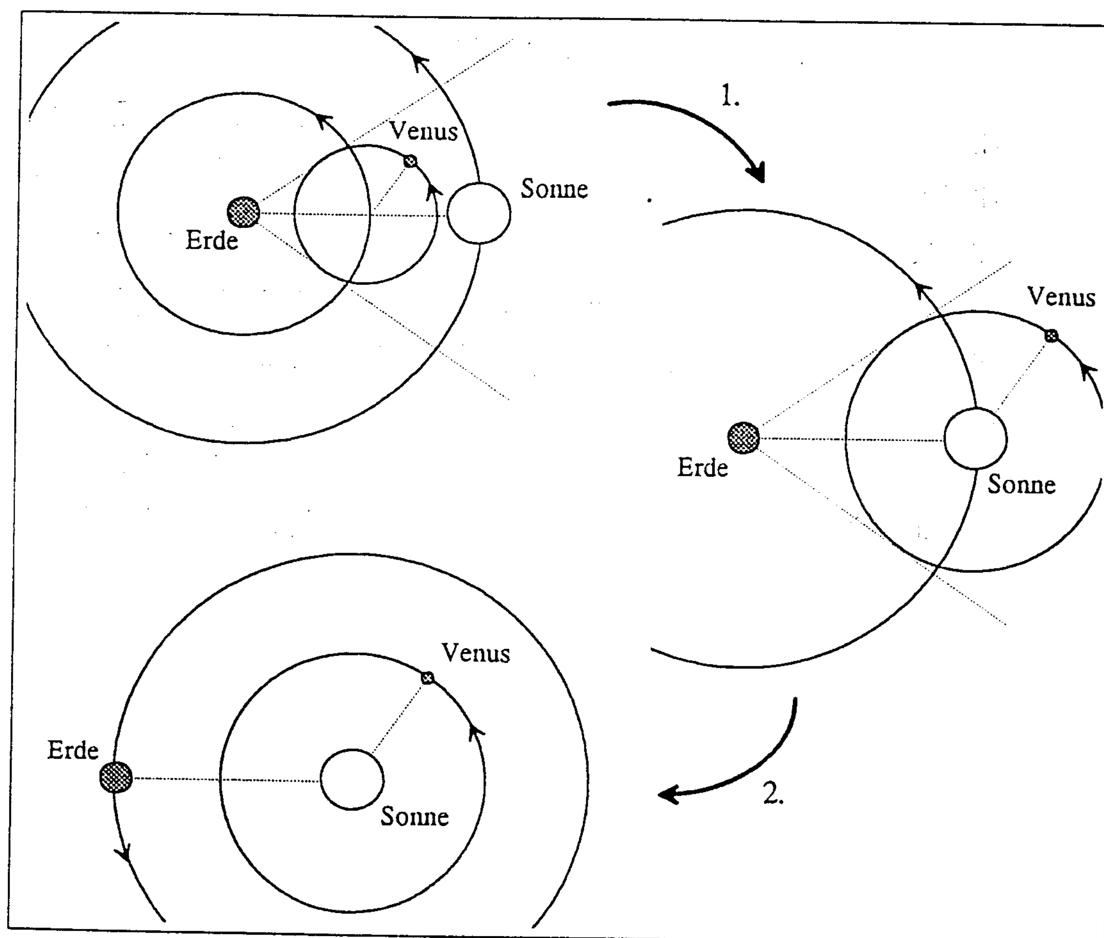


Abbildung 6 Transformation vom erdzentrierten zum sonnenzentrierten System für die inneren Planeten am Beispiel des Planeten Venus[37]

[37] Frei nachgezeichnet aus Rutherford, S. 36, ohne Abb.-Nr.

Der Deferent kann zu jeder Größe verändert werden, solange der Epizykel entsprechend proportional mitverändert wird. Der erste Schritt zu einem sonnenzentrierten System besteht nun darin, das Zentrum des Einjahres-Deferenten der Venus in die Sonne zu plazieren. Der Radius des Epizykels der Venus wird proportional zum Radius des Deferenten solange vergrößert, bis das Epizykelzentrum in der Sonne liegt, siehe Abbildung 6. Nun bewegt sich der Planet um die Sonne, während sich die Sonne noch um die Erde bewegt. Dies entspricht dem System von Tycho Brahe, in dem sich alle sichtbaren Planeten um die Sonne, die Sonne aber um die Erde bewegt. Kopernikus ging jedoch noch weiter. Er stellte sich vor, daß sich die Erde um die Sonne und nicht die Sonne um die Erde bewege. Im Kopernikanischen System wird der vergrößerte Epizykel nun zur Bahn der Venus um die Sonne, während der Deferent der Venus zur Bahn der Erde um die Sonne wird, siehe Abbildung 6. Damit erklären alle drei Systeme, das Ptolemäische, das Kopernikanische und das System von Tycho Brahe die gleichen Beobachtungen für die inneren Planeten.

Für die äußeren Planeten sind die Argumente recht ähnlich, wobei die Rollen der Epizykel und der Deferenten vertauscht werden. Für die äußeren Planeten im Ptolemäischen System gilt, daß die Epizykel anstatt der Deferenten die Einjahresperiode besitzen und sich dabei parallel mit der Bahn der Sonne bewegen. Die Größe der Deferenten hatte Ptolemäus so gewählt, daß sich die Epizykel eines jeden Planeten zum nächsten inneren und äußeren gerade nicht tangieren. Somit wurde der Zwischenraum ohne Überlappung und Lücken gefüllt. Dieses System kann man in Abbildung 7 sehen, wobei zur Vereinfachung alle Epizykelzentren der Planeten auf einer Linie liegen.

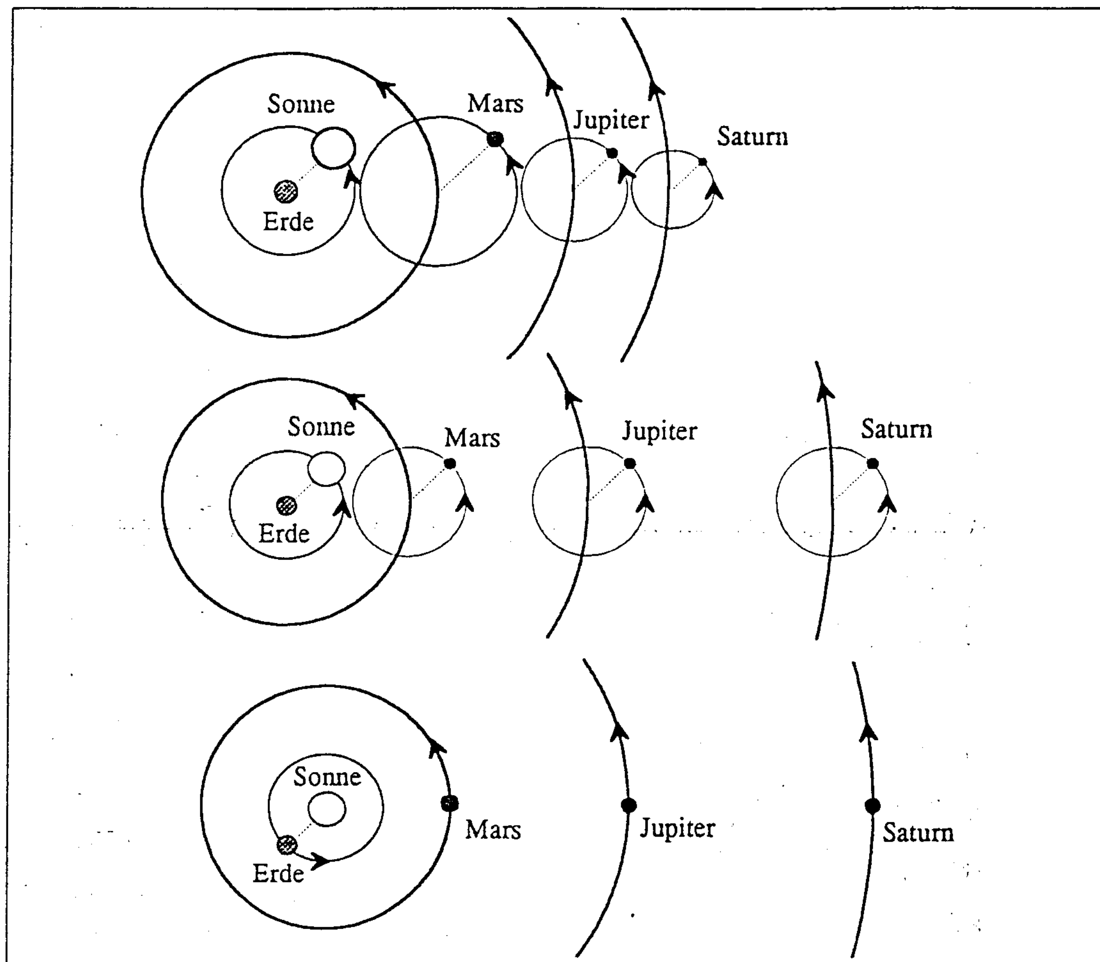


Abbildung 7 Transformation vom erdzentrierten zum sonnenzentrierten System für die äußeren Planeten[38]

Im ersten Schritt zu einem sonnenzentrierten System für die äußeren Planeten müssen die Größen der Deferenten angepaßt werden, wobei die Epizykelgröße in Proportion zur Deferentengröße bleiben muß. Die Deferenten werden solange vergrößert, bis die Einjahres-Epizykel der Planeten die gleiche Größe wie die Einjahresbahn der Sonne um die Erde besitzen, siehe Abbildung 7. Als nächstes kann die jährliche Sonnenbewegung um die Erde ebenso dadurch erklärt werden, indem man annimmt, daß sich die Erde um die Sonne bewegt. Damit kann nun allein mit der Erdbahn die rückläufigen Schleifen der äußeren Planeten erklärt werden, ohne einen Einjahres-Epizykel für jeden Planeten einzuführen. Somit werden alle Epizykel der äußeren Planeten durch die Bahnbewegung der Erde um die Sonne ersetzt, was in Abbildung 7 zu sehen ist. Die Deferenten der äußeren Planeten werden dadurch zu Bahnen der äußeren Planeten um die Sonne.

[38] Frei gezeichnet nach Rutherford, S. 37, ohne Abb.-Nr.

Wir haben gesehen, daß man durch einen Wechsel der Betrachtung vom **Ptolemäischen** über das **System von Brahe** zum **Kopernikanischen System** und wieder zurück gelangen kann, wodurch die **mathematische Gleichwertigkeit** gezeigt wäre.

3.4 Galileo Galilei

Das in allen Wissenschaften bewanderte Genie **Galileo Galilei** lebte von 1564 bis 1642. Mit Hilfe eines astronomischen Fernrohres beobachtete Galileo erstmals, daß

> "*die **Planeten** ebenso **Kugeln sind** wie die Erde und der Mond und daß sie nur deshalb leuchten, weil sie das Licht der Sonne zurückwerfen. Er zeigte auch, daß sich die Unterschiede in ihren scheinbaren Durchmessern auf die sich fortwährend ändernden Entfernungen, in denen sich die Planeten von der Erde befinden, zurückführen lassen.*"[39]

Galilei entdeckte auch, daß **einige Planeten** wie die Erde von einem **Satelliten** (lateinisch: Trabant, Leibwächter) umgeben sind. Dies eröffnete das physikalische Studium der Planeten. Weiter formulierte er einige Gesetze der Mechanik, wie das **Trägheitsgesetz** und das **Fallgesetz**, welche Newton später ermöglichten, diese Gesetze auf das Sonnensystem anzuwenden. Galilei selbst war ein Vertreter des Kopernikanischen Weltbildes, was ihm von Seiten der Amtskirche einige Schwierigkeiten einbrachte.

3.5 Johannes Kepler

Etwa sieben Jahre nach Galileis Geburt wurde **Johannes Kepler** (1571-1630) geboren. Er hatte das Vorrecht Gehilfe von Tycho Brahe zu sein, wodurch er Zugang zu den astronomischen Daten bekam. "*Dieses Erbe vermochte der wegen seiner Leistungen auf den Gebieten der Astronomie, Mathematik und Physik nicht weniger berühmte Gelehrte mit größtem Erfolg zu verwalten.*"[40] Kepler gilt heute als einer der bekanntesten Astronomen, was insbesondere an seinen drei uns noch heute bekannten Gesetzen liegt:

(K1) Die Planeten bewegen sich auf Ellipsen, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht.

[39] Callatay, S. 22, Hervorhebungen selbst eingefügt
[40] Callatay, S. 21

(K2) Der Fahrstrahl von der Sonne zum Planeten überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen.

(K3) Die Quadrate der Umlaufzeiten zweier Planeten verhalten sich wie die Kuben der großen Halbachsen der Ellipsen.

Die **drei Keplerschen Gesetze** leiten einen Umbruch im Geistesleben ein und löschen die letzten Spuren der aristotelischen Lehren aus. Die Annahme einer Kreisbahn ist endgültig abgetan, die Ellipsenbahn ersetzt diese bei allen Himmelskörpern. Ebenso werden gleichförmige Umlaufbewegungen nicht mehr anerkannt. Die lineare Geschwindigkeit hängt nur noch von dem Ort ab, an dem sich ein Körper auf seiner **Ellipsenbahn** befindet.[41] Somit ergibt sich das **heliozentrische Weltbild** (siehe Abbildung 8) als das folgende: die Sonne befindet sich im Mittelpunkt des Sonnensystems, die Planeten, einschließlich der Erde, laufen auf Ellipsenbahnen umher, wobei die **Sonne im Brennpunkt** aller ebenen elliptischen Planetenbahnen steht.

Nachdem Kepler nun die Grundlagen der modernen Astronomie gelegt hatte, machte er sich daran, die schon von Tycho Brahe geplanten Rudolphinischen Tafeln[42] zu berechnen.

"*Kepler ist sich seiner Berechnungen so sicher, daß er die nächsten Vorübergänge der Venus und des Merkur vor der Sonne voraussagt. Leider erlebte er nicht mehr den Erfolg seiner ersten Vorhersage, die sich am 7. November 1631 als richtig erwies. Er stirbt ein Jahr vor diesem ersten vorausgesagten Merkurdurchgang, am 15. November 1630, und es blieb dem französischen Astronomen Gassendi vorbehalten, zu beobachten, wie sich zur vorausgesagten Zeit Merkur als kleiner schwarzer Punkt vor der Sonnenscheibe abhob.*"[43]

Dies war ein wichtiger Baustein zur Bestätigung der Keplerschen Theorie des heliozentrischen Sonnensystems.

41 Dies kann man nachlesen in Callatay, S. 22
42 Zeittafeln der Planeten, auch Ephemeriden genannt
43 Callatay, S. 22

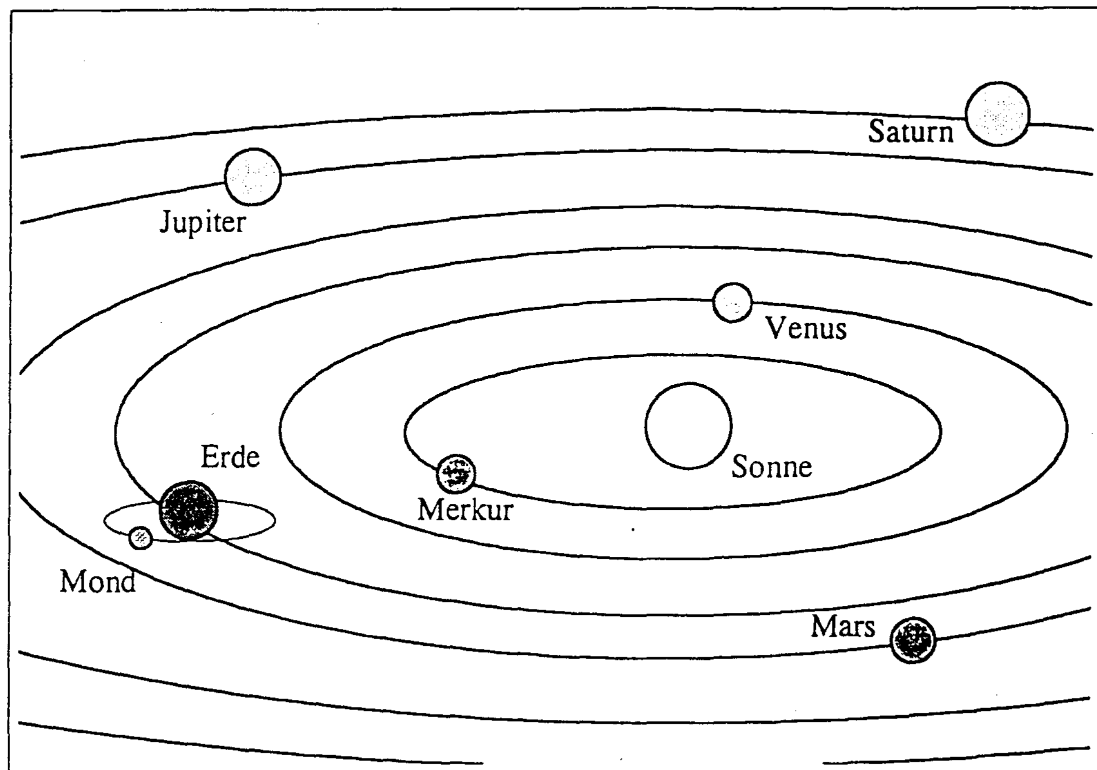


Abbildung 8 Prinzipieller Aufbau des Keplerschen Weltbildes, auch heliozentrisches Weltbild genannt, die Bahnen der Planeten sind schwach elliptisch

3.6 Isaac Newton

Beinahe auf den Tag genau nach dem Tod von Galileo Galilei wurde **Isaac Newton** am 5. Januar 1643 in England geboren. Auch er war, wie einige schon vor ihm, ein Universalgenie. Durch seine **Entdeckung der allgemeinen Schwerkraft** und der **Formulierung des Gravitationsgesetzes** bekam die Astronomie besonderen Aufwind. Dieses einfache physikalische Gesetz beschreibt Naturerscheinungen, die noch nicht vollkommen verstanden wurden; man denke dabei zum Beispiel an die Frage bzw. Suche nach den sogenannten Gravitonen, welche die Wechselwirkung zweier Massen beschreiben sollen. Selbst wenn die letzte Ursache dieser Erscheinung noch nicht geklärt ist, so kam man der wirkenden Ursache der Planetenbewegung entscheidend näher. Auch entsteht dieses Gesetz auf eindrucksvolle Weise aus den drei Keplerschen Gesetzen, wie anschließend noch gezeigt wird.

Das **Gravitationsgesetz** lautet:

(GG) Die Anziehung, die zwei materielle Körper aufeinander ausüben, ist direkt proportional dem Produkt der beiden Massen und umgekehrt proportional dem Quadrat der Entfernung ihrer Schweremittelpunkte.

Mit diesem Gravitationsgesetz hat man nun die Möglichkeit, die wirkenden Kräfte bei Planetenbewegungen besser zu verstehen. Zusätzlich wird es durch die **Newtonschen Axiome** möglich, das Problem durch Bewegungsgleichungen zu erfassen. Diese grundlegenden Axiome der klassischen Mechanik beinhalten:

(N1) Jeder Körper verharrt im Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen Bewegung, wenn er nicht durch einwirkende Kräfte gezwungen wird, diesen Zustand zu ändern (Galileisches Trägheitsgesetz).

(N2) Die Änderung des Impulses ist der Einwirkung der bewegenden Kraft proportional und geschieht in Richtung der Kraft:

$$\vec{F} = \dot{\vec{p}} = \frac{d}{dt}(m_t \vec{v}).$$

(Bewegungsgesetz), m_t: träge Masse des Körpers, auf den die Kraft einwirkt.

(N3) Jede Kraft $\vec{F}$ besitzt eine Gegenkraft $\vec{F'}$ (Reaktionskraft) von gleichem Betrag, aber entgegengesetzter Richtung:

$$\vec{F'} = -\vec{F}.$$

(actio = reactio, Wechselwirkungsprinzip)

Bezugssysteme, in denen sich ein kräftefreier Massenpunkt mit konstanter Geschwindigkeit auf einer Geraden bewegt, nennt man **Inertialsysteme**. Newton hat sich nicht damit zufrieden gegeben, diese Axiome aufzustellen, sondern hat sich auch intensiv damit beschäftigt, die dafür notwendige Mathematik zu erarbeiten, welche zur Lösung der sich ergebenden Bewegungsgleichungen nötig war. "*Er nannte **Fluxionsrechnung**, was wir heute **Infinitesimalrechnung** nennen.*"[44] In der Folgezeit wurde es

[44] Callatay, S. 23, Hervorhebung im Original

nötig zu zeigen, daß die Newtonschen Axiome und das von ihm formulierte Gravitationsgesetz nicht den Keplerschen Gesetzen widerspricht, da man sonst zwei rivalisierende physikalische Theorien gehabt hätte, die beide für sich genommen durch Experimente und Beobachtungen entstanden waren. Bald darauf gelang Newton zu zeigen, daß beide Formulierungen sich nicht widersprechen.

> "*Newton konnte durch seine Definition der Gravitationskraft nachweisen, daß die einzig möglichen Umlaufbahnen für ein Partikel, das sich unter dem Schwerkrafteinfluß eines anderen bewegt - beispielsweise ein Planet unter dem der Sonne - die Gestalt von Kegelschnitten haben: Ellipsen, Hyperbeln und Parabeln.*"[45]

Es läßt sich sogar zeigen, daß beide Formulierungen äquivalent sind. Diese Äquivalenz wird auch das Thema des nächsten Kapitels sein und im Anschluß daran werden noch einige Eigenschaften und Folgerungen der Newtonschen Mechanik behandelt.

3.7 Zusammenfassung

In der Zeit nach Kopernikus entstanden die für die Folgezeit **wichtigsten Weltbilder**. Das Weltbild von Kepler betrachten wir nun als den Vertreter des heliozentrischen Weltbildes und das Weltbild von Brahe als einen Vertreter des geozentrischen Weltbildes, wobei zur genaueren Beschreibung eher von Ellipsenbahnen ausgegangen werden muß, analog zur Keplerschen Theorie der Planetenbewegung. Diese Vorstellung ist zunächst denkbar, wenn man sich an das mathematisch äquivalente Ergebnis der **Transformation von Ptolemäischen zum Kopernikanischen Weltbild** erinnert. Ob diese Vorstellung auch physikalisch sinnvoll ist, werden wir bei der Behandlung der Eigenschaften und Folgerungen aus der Newtonschen Mechanik betrachten.

[45] Bernstein, S. 32

4 Äquivalenz von "Kepler" und "Newton"

Die Äquivalenz der Keplerschen und der Newtonschen Formulierung der Planetenbewegung wird in drei Kapitel vollzogen, wobei diese durch ein Kapitel vorbereitet werden, welches die **Leitlinieneigenschaft der Ellipse** verdeutlicht. Ein nachbereitendes Kapitel liefert alle Eigenschaften, die zu den Keplerschen Gesetzen zurückführen werden. Die Idee des Beweises der mathematischen Äquivalenz von "Kepler" und "Newton" basiert auf einer Veröffentlichung von Andrew T. Hyman mit dem Titel "Die mathematische Beziehung zwischen Keplers Gesetzen und Newtons Gesetzen"[46]. Das vorbereitende und das nachbereitende Kapitel wurden ergänzt, da die Theorie der Kegelschnitte heutzutage nicht mehr unbedingt zur Allgemeinbildung gehört. Bei der Beschreibung der Planetenbewegung geht Kepler von einem heliozentrischen Weltbild aus, welches wir ebenso in der mathematischen Beschreibung voraussetzen.

4.1 Vorbereitung: Leitlinieneigenschaft der Ellipse

Eine Ellipse ist die Menge der Punkte der reellen Zahlenebene mit folgender Eigenschaft:

Definition 1: $E = \left\{(x,y) \in \Re^2 : \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1\right\}$ ist eine Ellipse mit den Hauptachsen a und b, wobei $a, b \in \Re$ und $0 < b \leq a$ ist (siehe Abbildung 9).

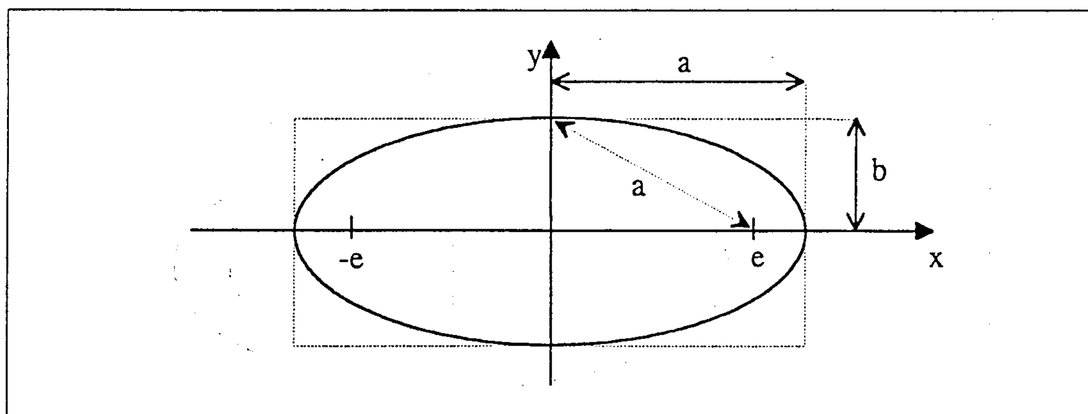


Abbildung 9 Ellipse mit den Halbachsen a und b, sowie die Orte der Brennpunkte bei x = e und x = -e

[46] Hyman, Andrew T., The Mathematical Relationship Between Kepler's Laws and Newton's Laws, AMM, December 1993, S. 932-936

Weiterhin wird es sich als nützlich erweisen die sogenannten **Brennpunkte** einzuführen:

Definition 2: $e := \sqrt{a^2 - b^2}$ liefert die Koordinaten der Brennpunkte $F_1 = (e, 0)$ und $F_2 = (-e, 0)$ der Ellipse E (siehe Abbildung 10).

Diese Definitionen ermöglichen es nun, eine erste geometrische Eigenschaft der Ellipse zu beweisen, da man diese auf einfache Weise gewinnen kann. Diese Eigenschaft findet Verwendung in der sogenannten **Fadenkonstruktion** einer Ellipse:

Satz 1: Für jeden Punkt p der Ellipse E gilt: $\overline{pF_1} + \overline{pF_2} = 2$

Beweis: Setzen wir für den Punkt $p = (x, y)$, so bedeutet dies für die zu beweisende Aussage

$$\sqrt{(x-e)^2 + y^2} + \sqrt{(x+e)^2 + y^2} = 2a$$

Zweimaliges Quadrieren und Umformen liefert dann

$$(a^2 - e^2)x^2 + a^2y^2 = a^2(a^2 - e^2$$

Setzt man nun $a^2 - e^2 = b^2$ (Definition 2) so ergibt sich

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1,$$

was zu beweisen war.

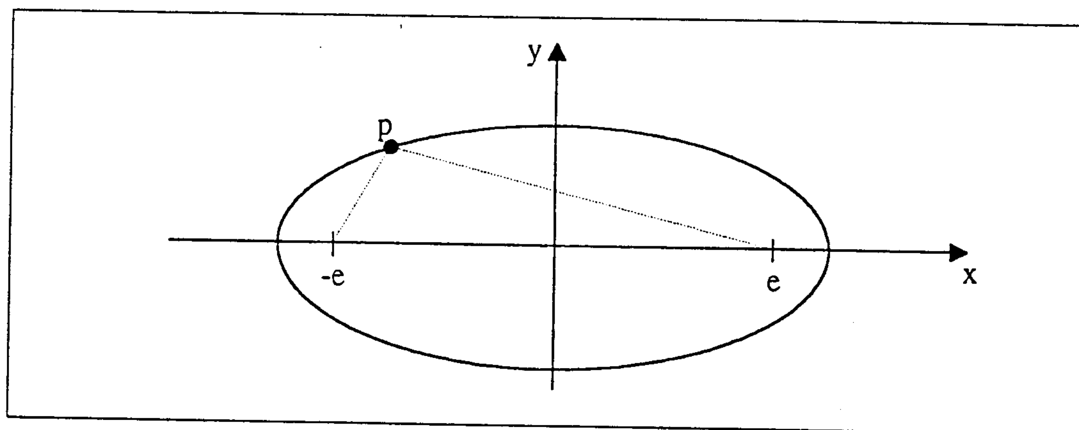


Abbildung 10 Ellipse mit den beiden Brennpunkten

Nun kommen wir zu der für uns im folgenden wichtigen geometrischen Eigenschaft einer Ellipse, die sogenannte **Leitlinieneigenschaft**. Zuvor definieren wir noch, was

man unter einer **Leitlinie** und unter der **Exzentrizität** versteht. Dieser Sachverhalt wird durch Abbildung 11 verdeutlicht.

Definition 3: Für die Ellipse E sind die Leitlinien gegeben durch

$$L_1 = \left\{(x,y) \in \Re^2 : x = \tfrac{a^2}{e}\right\} \text{ und } L_2 = \left\{(x,y) \in \Re^2 : x = -\tfrac{a^2}{e}\right\}.$$

Aus Symmetriegründen genügt es, sich auf eine Leitlinie zu beschränken und von dieser als der Leitlinie zu sprechen, in unserem Fall werden wir L_1 dafür verwenden und nur noch von der Leitlinie L sprechen. Als nächstes führen wir die Exzentrizität ε ein, die ein Maß für die Abweichung der Ellipse vom Kreis ist:

Definition 4: Die Exzentrizität ε einer Ellipse E ist gegeben durch $\varepsilon := \frac{e}{a}$, wobei $0 \leq \varepsilon < 1$ gilt.

Nach diesen Vorbereitungen können wir nun zur eigentlichen Eigenschaft (Leitlinieneigenschaft) kommen, welche wir später noch verwenden werden:

Satz 2: Für jeden Punkt p der Ellipse E gilt: $\overline{pF} : \overline{pL} = \varepsilon$.

Beweis: Quadriert man die zu beweisende Bedingung, so ergibt sich

$$\left[(x-e)^2 + y^2\right] : \left[\left(\frac{a^2}{e} - x\right)^2\right] = \varepsilon^2 = \frac{e^2}{a^2}.$$

Einiges Umformen liefert dann:

$$\left(\frac{a^2 - e^2}{a^2}\right)x^2 + y^2 = a^2 - e^2,$$

welches durch Einsetzen von $b^2 = a^2 - e^2$ und Umformen auf

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$

führt, was zu beweisen war.

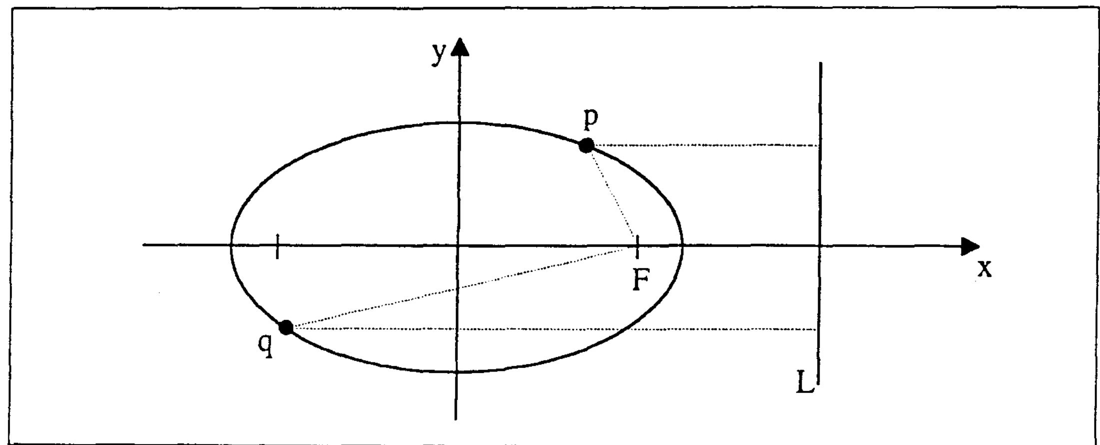


Abbildung 11 Ellipse mit einer dazu korrespondierenden Leitlinie L

Mit dieser Leitlinieneigenschaft werden wir nun die Keplerschen Gesetze in solcher Weise umformulieren, daß wir diese für die weiteren Schritte verwenden können.

4.2 Umformulierung der Keplerschen Gesetze

Zur Umformulierung der Keplerschen Gesetze wählen wir ein Koordinatensystem, welches den Ursprung im Brennpunkt F_1 hat. Dies hat den Vorteil, daß nun das zweite Keplersche Gesetz einfacher zu formulieren ist. Der Abstand Brennpunkt-Leitlinie ergibt sich aus einer einfachen Rechnung:

$$\overline{F_1 L} = \frac{a^2}{e} - e = \frac{b^2}{e} = \frac{D}{\varepsilon}$$

wobei wir $D = \frac{b^2}{a}$ als Konstante eingeführt haben.

Diese neue Konstante D definiert den Abstand des Brennpunktes zum Schnittpunkt der Ellipse mit der y-Achse, was sich leicht aus der Leitlinieneigenschaft herleiten läßt. Damit ergibt sich nun folgendes Bild:

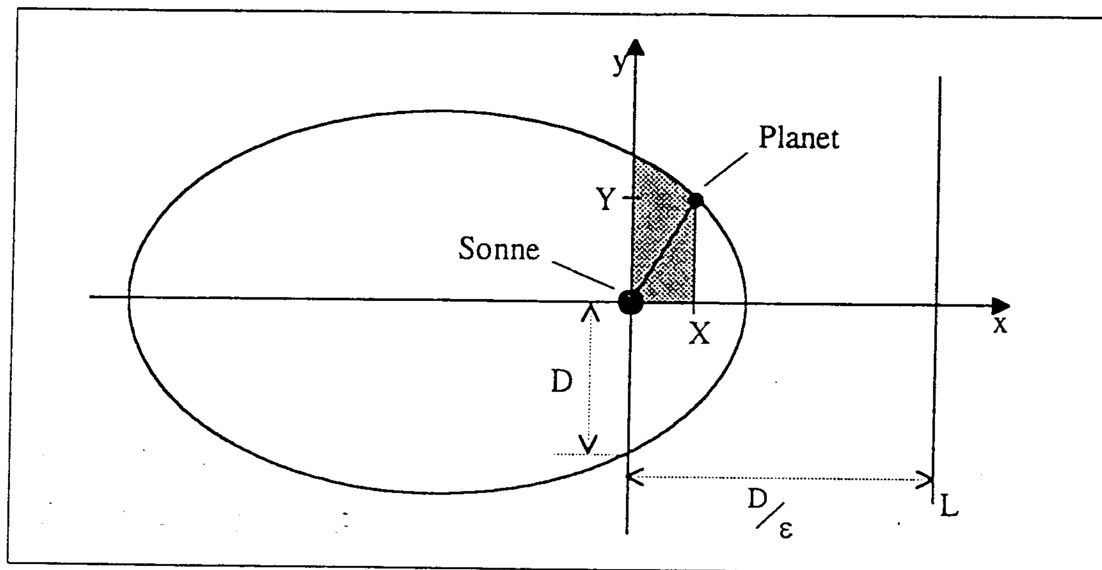


Abbildung 12 Ellipsenbahn eines Planeten um die Sonne, die in einem Brennpunkt sitzt, mit eingezeichneter Leitlinie L[47]

Die Keplerschen Gesetze können nun umformuliert werden, wobei wir den Planeten als Punktmasse annehmen. Weiter sei der Planet zur Zeit t am Ort mit den Koordinaten (X, Y), siehe Abbildung 12. Die Sonne sitzt im Ursprung des Koordinatensystems und befindet sich damit zugleich im Brennpunkt. Die Leitlinie des Planeten schneidet die x-Achse in einem Abstand D/ε von der Sonne. Gemäß dem ersten Keplerschen Gesetz, ist der Abstand $R = \sqrt{X^2 + Y^2}$ mittels Leitlinieneigenschaft durch folgende Gleichung gegeben:

$$R = D - \varepsilon X \qquad (1)$$

Das zweite Keplersche Gesetz kann auch auf ähnlich einfache Weise formuliert werden. Angenommen der Planet schneidet die y-Achse zur Zeit t_0, dann ergibt sich die überstrichene Fläche zwischen t und t_0 durch das Integral unter der Ellipsenkurve abzüglich der Dreiecksfläche unterhalb der Verbindungslinie von der Sonne zum Planeten. Somit ergibt sich zu jeder Zeit:

$$\int_0^X y\,dx - \frac{XY}{2} = C(t - t_0) \ . \qquad (2)$$

Hierbei ist C die konstante Flächengeschwindigkeit des Fahrstrahles Sonne-Planet (man beachte jedoch, daß nach jedem x-Achsendurchgang eine neue Konstante t_0 eingeführt werden muß).

[47] Frei gezeichnet nach Hyman, S. 933, Abb. 1

Man kann die Konstante C auch genau angeben, sie ist gegeben durch das Verhältnis der Ellipsenfläche F zur Umlaufzeit T, also:

$$C = \frac{F}{T} = \frac{\pi ab}{T}. \tag{3}$$

Die Halbachsen der Ellipse E kann man nun auch durch die neue Konstante D ausdrücken, nach Gleichung 1 und den speziellen Fällen R = a und X = R ergibt sich $a = \frac{D}{1+\varepsilon^2}$, und mit $b^2 = a^2 - e^2$ bekommt man auch $b = \frac{D}{\sqrt{1+\varepsilon^2}}$ Diese beiden Gleichungen und Gleichung 3 werden nun benötigt, um das dritte Keplersche Gesetz zu formulieren. Aus diesen Gleichungen folgt

$$K = \left(\frac{\pi}{T}\right)^2 a^3 = \frac{C^2}{D}, \tag{4}$$

wobei die Konstante K für alle Planeten gleich ist.

Zusammengestellt lauten die umformulierten **Keplerschen Gesetze** nun

(K1') $R = D - \varepsilon X$

(K2') $\int_0^X y dx - \frac{XY}{2} = C(t - t_0)$

(K3') $K = \frac{C^2}{D}$.

Mit dieser Formulierung der Keplerschen Gesetze werden wir im nächsten Schritt das Newtonsche Gravitationsgesetz herleiten.

4.3 Aus "Kepler" folgt "Newton"

Nun werden wir aus den Keplerschen Gesetzen die Beschleunigung eines Planeten auf seinem Weg um die Sonne berechnen. Differenzieren von (K1') liefert:

$$\frac{1}{R}\left[X\dot{X} + Y\dot{Y}\right] = -\varepsilon \dot{X} \quad . \tag{5}$$

Differenzieren von (K2'), unter Ausnutzung des Fundamentalsatzes der Differential- und Integralrechnung, sowie der Ketten- und Produktregel ergibt:

$$Y\dot{X} - X\dot{Y} = 2C \quad . \tag{6}$$

Jetzt lösen wir diesen beiden Gleichungen nach den beiden Geschwindigkeitskomponenten auf. Dies geschieht, indem wir Gleichung 5 mit "RX" und Gleichung 6 mit "Y" multiplizieren und anschließend diese beiden veränderten Gleichungen addieren. Anschließendes Umstellen und Ausnutzen von (K1') ergibt:

$$\dot{X}=\frac{2C}{D}\cdot\frac{Y}{R} \quad . \tag{7}$$

Analog erhält man auch die nächste Gleichung, jedoch mit Differenzbildung und Austausch von "X" und "Y" beim Multiplizieren:

$$\dot{Y}=-\frac{2C}{D}\cdot\left[\frac{X}{R}+\varepsilon\right] . \tag{8}$$

Wir gehen zu Gleichung 6 zurück und differenzieren diese, dies liefert nun:

$$Y\ddot{X}-X\ddot{Y}=0 \quad . \tag{9}$$

Um Gleichung 7 zu differenzieren, benötigen wir folgende Identität:

$$\frac{d}{dt}\left[\frac{Y}{R}\right]=\frac{X}{R^3}\cdot\left[X\dot{Y}-Y\dot{X}\right] . \tag{10}$$

Differentiation von Gleichung 7 und Ausnutzen der Gleichungen 10 und 6 ergibt:

$$\ddot{X}=-4K\cdot\frac{X}{R^3} \quad . \tag{11}$$

Gleichung 11 in 9 eingesetzt liefert

$$\ddot{Y}=-4K\cdot\frac{Y}{R^3} \quad . \tag{12}$$

Die Gleichungen 11 und 12 können nun in kompakter Vektorform geschrieben werden.

$$\ddot{\vec{R}}=-4K\cdot\frac{\vec{R}}{R^3} \quad . \tag{13}$$

Gleichung 13 ist Newtons Gravitationsgesetz der Planetenbewegung unter der Annahme, daß die Planetenmasse vernachlässigt werden kann. Das Besondere an dieser Herleitung ist, daß sie nicht auf Polarkoordinaten zurückgreift, sondern **kartesische Koordinaten** verwendet. Dies ist ein Beispiel dafür, wie man mittels günstiger

Formulierung und relativ einfachen Mitteln ein physikalisch interessantes Ergebnis bekommen kann.

Dem aufmerksamen Leser mag nun vielleicht die ungewohnte Formulierung von Gleichung 13 aufgefallen sein. Eventuell hegt man sogar Zweifel, ob diese auch tatsächlich die übliche Gleichung ist, die man sonst auf Anhieb kennt. Zur Aufhellung dieses Problems noch eine kurze Bemerkung. Wie man leicht nachvollziehen kann gilt[48]:

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{\pi^2 D}{C^2} = \frac{4\pi^2}{G \cdot M} \quad \text{woraus} \quad \frac{C^2}{D} = \frac{G \cdot M}{4} \quad \text{folgt.}$$

Diese Identität nutzen wir nun für folgende Rechnung aus:

$$4K = 4\frac{C^2}{D} = G \cdot M$$

und erhalten damit das wohlbekannte Gravitationsgesetz von Newton.

4.4 Aus "Newton" folgt "Kepler"

Nun bleibt noch zu zeigen, ob eine gebundene Planetenbahn ebenso Gleichung 13 genügen kann, wenn diese nicht den Keplerschen Gesetzen entspricht. Also die Frage, ob ein gebundener Planet gemäß Gleichung 13 beschleunigen kann und dennoch nicht die Keplerschen Gesetze erfüllt. Wir werden nun zeigen, daß eine solche Planetenbahn nicht möglich ist, indem wir die Keplerschen Gesetze aus Gleichung 13 wiedergewinnen.

Es sollte noch erwähnt werden, daß die Bewegung in einer Ebene verläuft. Dies ergibt sich aus der Form von Gleichung 13, welche die Bewegungsgleichung eines Körpers in einem Zentralkraftpotential darstellt. Die Ebene ist festgelegt durch die Sonne als Aufpunktsort und die Richtungen der Ebene durch die Verbindungslinie Planet-Sonne und die Anfangsgeschwindigkeit des Planeten; der Sonderfall, daß die Anfangsgeschwindigkeit auf der Linie Planet-Sonne liegt, reduziert die Bewegung auf eine eindimensionale Translation.

[48] Siehe auch Nolting, Band I, S. 197

Nun werden wir aus Gleichung 13 die Keplerschen Gesetze wiedergewinnen. Gleichung 11 und Gleichung 12 führen auf Gleichung 9, indem man Gleichung 11 mit "Y" und 12 mit "X" multipliziert und die so erhaltenen Gleichungen voneinander subtrahiert. Integration von Gleichung 9 führt auf 6, wobei die linke Seite dieser Gleichung in Proportion zur **Flächengeschwindigkeit** steht. Da die Flächengeschwindigkeit proportional zum Drehimpuls und zudem konstant ist, ergibt sich hieraus, daß die Bahnbewegung des Planeten um die Sonne in einer Ebene verläuft. Nochmaliges Integrieren der Gleichung 6 führt auf (K2').

Einsetzen von Gleichung 6 in Identität 10 liefert

$$\frac{d}{dt}\left[\frac{Y}{R}\right] = -2C \cdot \frac{X}{R^3} \tag{14}$$

Ausnutzen der Gleichung 11 in dieser Gleichung führt zunächst auf

$$\frac{d}{dt}\left[\frac{Y}{R}\right] = \frac{C}{2K} \cdot \frac{d}{dt}\dot{X}$$

und nach anschließendem Integrieren von beiden Seiten erhalten wir

$$\frac{Y}{R} = \frac{C}{2K} \cdot \dot{X} + A \ , \tag{15}$$

wobei A eine Integrationskonstante ist.

Hierbei hat sich, wie wir gesehen haben, die Identität 10 sehr nützlich erwiesen, die durch die Herleitung im vorherigen Kapitels **nicht "aus der Luft gegriffen"** erscheint. Durch das vorherige Kapitel sind wir auf ganz natürliche Weise zu dieser Identität gelangt.

Durch Vertauschen von "X" und "Y" in Gleichung 10 und Einsetzen der Gleichung 6 in Gleichung 10 erhalten wir

$$\frac{d}{dt}\left[\frac{X}{R}\right] = 2C \cdot \frac{Y}{R^3} \ . \tag{16}$$

Indem wir nun von Gleichung 12 Gebrauch machen, erhalten wir zunächst

$$\frac{d}{dt}\left[\frac{X}{R}\right] = -\frac{C}{2K} \cdot \frac{d}{dt}\dot{Y} \ .$$

Anschließendes Integrieren dieser Gleichung führt nun auf

$$\frac{X}{R} = -\frac{C}{2K} \cdot \dot{Y} + B \ , \qquad (17)$$

wobei B eine weitere Integrationskonstante ist. Die Bedeutung der beiden Integrationskonstanten A und B für dieses **Zwei-Körper-Problem** ergebt sich aus der nachfolgenden Betrachtung.

Nun setzen wir noch Gleichung 15 und 17 in Gleichung 6 ein und erhalten nach einigen Umrechnungen und Ausnutzen von $R^2 = X^2 + Y^2$ schließlich

$$\frac{C^2}{K} + AY + BX = R \ . \qquad (18)$$

Wenn $A = B = 0$ ist, dann beschreibt diese Gleichung einen **Kreis**. Ansonsten ergibt Gleichung 18 einen Kegelschnitt mit **Brennpunkt im Ursprung, Exzentrizität** $\varepsilon = \sqrt{A^2 + B^2}$ und einem Leitlinien-Brennpunkt-Abstand von D/ε, woraus (K1') und (K3') hervorgehen. Die **Leitlinie** zum Kegelschnitt der Gleichung 18 ist dabei gegeben durch:

$$\frac{C^2}{K} + A \cdot y + B \cdot x = 0 \ .$$

Im nachfolgenden Kapitel wird behandelt, wie man aus Gleichung 18 alle eben genannten Eigenschaften erhalten kann.

Also sehen wir nun: wenn Newtons Gravitationsgesetz gilt, dann müssen die gebundenen Planetenbahnen die Keplerschen Gesetze erfüllen. Dies gilt ebenso in der anderen Richtung, was zu zeigen war.

4.5 Nachbereitung: Kegelschnitte als Kurven 2. Ordnung

Nun bleibt noch die Aufgabe, aus Gleichung 18 alle jene Eigenschaften herauszufinden, die auf die Keplerschen Gesetze führen. Dabei werden wir zwei mögliche Wege gehen. Einen etwas längeren, bei dem wir auch auf die **ungebundenen Planetenbahnen** eingehen werden. Ebenso zeigen wir dabei, daß Gleichung 18 tatsächlich in die Form der Ellipsengleichung aus Definition 1 überführt werden kann, und werden zusätzlich die Lage der Bahnen im Koordinatensystem feststellen. Anschließend gehen

wir einen kürzeren Weg, bei welchem das Wissen um die Lage der Bahnen benutzt wird, um die Ergebnisse auf einfacherem Weg zu erhalten.

4.5.1 Kurven 2. Ordnung mit Hilfe der Linearen Algebra

Zunächst bringen wir Gleichung 18 auf eine **symmetrische Bilinearform**. Durch Quadrieren und Umformen können wir 18 in folgende Gestalt bringen:

$$z^T \cdot A \cdot z + 2 \cdot b^T \cdot z + c = 0 \;, \tag{19}$$

wobei für $z = \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}$, $A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{12} & a_{22} \end{pmatrix}$ und $b = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix}$ gilt, mit den eingeführten Konstanten $a_{11} = B^2 - 1$; $a_{12} = AB$; $a_{22} = A^2 - 1$; $b_1 = \frac{C^2}{K} \cdot B$; $b_2 = \frac{C^2}{K} \cdot A$ und $c = \frac{C^4}{K^2}$.

Jetzt gibt es zunächst zwei mögliche Fälle, die zu unterscheiden sind, ob nämlich die Determinante von A gleich oder ungleich Null ist. Betrachten wir also zunächst den ersten Fall.

I) det A = $\Delta = 0$, d.h. es ist **kein Symmetriezentrum** vorhanden. Aus $\Delta = 0$ folgt $A^2 + B^2 = 1$, wodurch sich die Matrix A nun vereinfacht auf

$$A = \begin{pmatrix} -A^2 & AB \\ AB & -B^2 \end{pmatrix} .$$

Zur Transformation auf Normalform bestimmen wir Eigenwerte und Eigenvektoren der Matrix A und erhalten

$$\lambda_1 = -1;\ \lambda_2 = 0;\ v_1 = \begin{pmatrix} A \\ -B \end{pmatrix};\ v_2 = \begin{pmatrix} B \\ A \end{pmatrix},$$

woraus wir nun ebenso die Transformationsmatrix S erhalten:

$$S = \begin{pmatrix} A & B \\ -B & A \end{pmatrix} .$$

Durch die Transformation (Drehung) $z = S^T w$ überführen wir Gleichung 19 nun in das Koordinatensystem der Normalform:

$$w^T \Lambda w + 2 b^T S^T w + c = 0 \;,$$

wobei $\Lambda = SAS^T = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}; w = \begin{pmatrix} v \\ u \end{pmatrix} = S \cdot z$ und $S^T = S^{-1}$ gilt. Ausrechnen und Umformen liefert schließlich

$$u = \frac{K}{2C^2} \cdot v^2 - \frac{C^2}{2K}. \tag{20}$$

Gleichung 20 ist eine **Parabelgleichung**, welche die Bewegung auf einer **ungebundenen Planetenbahn** darstellt.

Nun betrachten wir den interessanteren Fall:

II) $\Delta \neq 0$, d.h. es ist ein **Symmetriezentrum** vorhanden. Daher transformieren wir die Gleichung 19 durch eine Translation $t = -A^{-1}b$ ins Symmetriezentrum, setzen also für z = z' + t, lassen aber anschließend den Strich wieder weg, und erhalten nach einigen Schritten

$$z^T A \cdot z + d = 0 \;, \tag{21}$$

wobei $d = b^T t + c = \dfrac{C^4}{K^2(1 - A^2 - B^2)}$ gilt.

Um auf die Normalform transformieren zu können, bestimmen wir nun die Eigenwerte und normierten Eigenvektoren von A, diese sind:

$$\lambda_1 = -1;\ \lambda_2 = A^2 + B^2 - 1 \quad \text{und}$$

$$\vec{v}_1 = \frac{1}{\sqrt{A^2 + B^2}} \begin{pmatrix} A \\ -B \end{pmatrix};\ \vec{v}_2 = \frac{1}{\sqrt{A^2 + B^2}} \begin{pmatrix} B \\ A \end{pmatrix}.$$

Daraus erhalten wir die nötige Transformationsmatrix S als

$$S = \frac{1}{\sqrt{A^2 + B^2}} \begin{pmatrix} A & B \\ -B & A \end{pmatrix}.$$

Durch die Transformation (Drehung) $z = S^T w$ überführen wir Gleichung 21 in das Koordinatensystem der Normalform:

$$w^T \Lambda w + d = 0 \;,$$

wobei $\Lambda = SAS^T = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix}, w = \begin{pmatrix} v \\ u \end{pmatrix}$ und $S^T = S^{-1}$ gilt. Ausrechnen und Umformen führt schließlich auf

$$(1-A^2-B^2)^2 \cdot \frac{K^2}{C^4} \cdot u^2 + (1-A^2-B^2) \cdot \frac{K^2}{C^4} \cdot v^2 = 1 \ . \qquad (22)$$

Hieran erkennt man, daß eine weitere Unterscheidung nötig wird: $A^2+B^2>1$ oder $A^2+B^2<1$. Den Fall $A^2+B^2=1$ haben wir schon in I) behandelt. Betrachten wir zunächst den ersten Fall.

a) $A^2+B^2>1$, d.h. $\Delta<0$. Daher setzen wir

$$a^2 = \frac{C^4}{K^2(1-A^2-B^2)^2} \text{ und } -b^2 = \frac{C^4}{K^2(1-A^2-B^2)} ,$$

was schließlich auf eine **Hyperbelgleichung** führt:

$$\frac{u^2}{a^2} - \frac{v^2}{b^2} = 1. \qquad (23)$$

Gleichung 23 ist wiederum die Darstellung für eine **ungebundene Planetenbahn**.

b) $A^2+B^2<1$, d.h. $\Delta>0$. Wir setzen daher nun

$$a^2 = \frac{C^4}{K^2(1-A^2-B^2)^2} \text{ und } b^2 = \frac{C^4}{K^2(1-A^2-B^2)} \qquad (24)$$

und erhalten schließlich die Gleichung für eine **Ellipse**:

$$\frac{u^2}{a^2} + \frac{v^2}{b^2} = 1. \qquad (25)$$

Gleichung 25 ist die Darstellung einer **gebundenen Planetenbahn**.

Wir haben die drei möglichen Fälle diskutiert, die aus der Gleichung 18 hervorgehen können, falls A und B zugleich nicht Null sind. Nun kommen wir noch zu den Eigenschaften der Ellipse aus Gleichung 25 mit den Halbachsen, die in Gleichung 24 festgelegt sind. Berechnen der Brennpunkte ergibt

$$e = \sqrt{a^2-b^2} = \sqrt{A^2+B^2} \cdot a ,$$

was uns folglich auf die Exzentrizität ε führt:

$$\varepsilon = \frac{e}{a} = \sqrt{A^2+B^2} \ . \qquad (26)$$

Dies harmoniert auch mit der oben getroffenen Fallunterscheidung für die Fälle Parabel, Hyperbel und Ellipse.

Für die Leitlinie im Koordinatensystem der Normalform der Ellipse ergibt sich

$$u_L = \frac{a^2}{e} = \frac{a}{\varepsilon}.$$

Damit können wir nun den Abstand Leitlinie-Brennpunkt bestimmen und erhalten:

$$u_L - e = \frac{1-\varepsilon^2}{\varepsilon} \cdot a = \frac{C^2}{K} \cdot \frac{1}{\varepsilon} = \frac{D}{\varepsilon}. \qquad (27)$$

Mit (27) ergeben sich die Halbachsen der Ellipse zu

$$a = \frac{D}{1-\varepsilon^2} \text{ und } b = \frac{D}{\sqrt{1-\varepsilon^2}}. \qquad (28)$$

Bei der Transformation der Gleichung 19 durch die Translation

$$t = -A^{-1}b = \frac{D}{1-\varepsilon^2}\begin{pmatrix} B \\ A \end{pmatrix}$$

wurde die Ellipse um den Betrag $|t| = \frac{D \cdot \varepsilon}{1-\varepsilon^2} = a \cdot \varepsilon = e$ verschoben, d.h. die Gleichung 18 repräsentiert in diesem Fall ($\Delta > 0$) eine Ellipse, deren **Brennpunkt im Ursprung** des Koordinatensystems liegt.

Damit haben wir alle geforderten Eigenschaften der Ellipse in den Gleichungen 26, 27 und 28 gefunden, die auf die Keplerschen Gesetze führen. Anschließend sind alle aufgetretenen Fälle nochmals zusammengestellt:

1) $A = B = 0$: Ausnahmefall, führt auf den **Kreis**:

$$\sqrt{x^2 + y^2} = \frac{C^2}{K} = D.$$

2) $\Delta = 0 \Leftrightarrow \varepsilon = 1$: Fall ohne Symmetriezentrum, liefert eine **Parabel**:

$$u = \frac{1}{2D} \cdot v^2 - \frac{D}{2}.$$

3) $\Delta < 0 \Leftrightarrow \varepsilon > 1$: Fall mit Symmetriezentrum, ergibt eine **Hyperbel**:

$$\frac{D^2}{(1-\varepsilon^2)^2} \cdot u^2 - \frac{D^2}{1-\varepsilon^2} \cdot v^2 = 1.$$

4) $\Delta > 0 \Leftrightarrow \varepsilon < 1$: Fall mit Symmetriezentrum, liefert eine **Ellipse**:

$$\frac{D^2}{(1-\varepsilon^2)^2} \cdot u^2 + \frac{D^2}{1-\varepsilon^2} \cdot v^2 = 1 .$$

Man hätte diese Gleichungen auch einfach in Tabellen nachschlagen können, in denen Kurven 2. Ordnung systematisch aufgeführt sind, jedoch wäre dabei die Entwicklung der verschiedenen **Kegelschnitte** nicht zur Geltung gekommen.

4.5.2 Kurven 2. Ordnung mit Hilfe der Analytischen Geometrie

Als erstes benötigen wir den Abstand eines Punktes von einer vorgegebenen Gerade. Die Gerade sei durch $a \cdot x + b \cdot y + c = 0$ vorgegeben. Dann ergibt sich aus der Normalform dieser Geradengleichung (Hessesche Normalform) der Abstand eines Punktes $p = (x_0, y_0)$ von der Geraden als

$$d = \frac{|a \cdot x_0 + b \cdot y_0 + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}}. \tag{29}$$

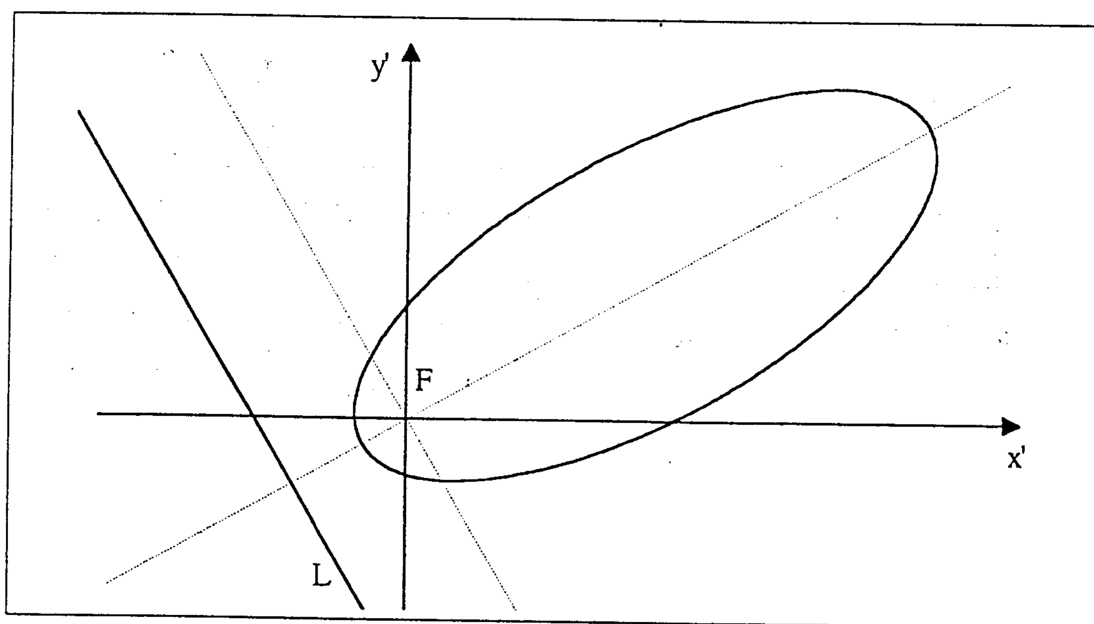


Abbildung 13 Gedrehte Ellipse mit Brennpunkt im Ursprung und eingezeichneter Leitlinie

Wählen wir nun einen Punkt p auf der Kurve, die durch Gleichung 18 gegeben ist und berechnen den Abstand dieses Punktes zur Geraden der Gleichung 19, so erhalten wir

$$d = \frac{\left|A \cdot x_0 + B \cdot y_0 + \frac{C^2}{K}\right|}{\sqrt{A^2 + B^2}} = \frac{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}}{\sqrt{A^2 + B^2}} = \frac{\overline{pF}}{\sqrt{A^2 + B^2}} = \overline{pL} \quad .$$

Daraus folgt schließlich:

$$\overline{pF} : \overline{pL} = \sqrt{A^2 + B^2} = \varepsilon \quad .$$

Dies ist die Leitlinieneigenschaft für die **Parabel** ($\varepsilon = 1$), **Hyperbel** ($\varepsilon > 1$) und **Ellipse** ($\varepsilon < 1$), deshalb haben wir einen **Kegelschnitt** vorliegen. Somit haben wir zugleich die Exzentrizität $\varepsilon = \sqrt{A^2 + B^2}$ und die Information erhalten, daß der Brennpunkt der Ellipse im Ursprung liegt.

Schließlich betrachten wir noch den Abstand Leitlinie-Brennpunkt (Ursprung):

$$\overline{FL} = \frac{\left|A \cdot x_0 + B \cdot y_0 + \frac{C^2}{K}\right|}{\sqrt{A^2 + B^2}} = \frac{C^2}{K \cdot \varepsilon} = \frac{D}{\varepsilon} ,$$

womit alle erforderlichen Eigenschaften gezeigt wären.

4.6 Zusammenfassung

Die **Keplersche** und die **Newtonsche Formulierung der Planetenbewegung** beschreiben auf einfache Weise die Bewegung zweier Massen, mit der Sonne im Brennpunkt der Planetenbahn. Da diese sich **nicht widersprechen**, sondern sogar auseinander hervorgehen, kann man verstehen, daß sich in der Folgezeit das **heliozentrische Weltbild mehr und mehr durchgesetzt** hat.

5 Newtonsche Mechanik - Voraussetzungen, Eigenschaften und Folgerungen

Das 17. Jahrhundert hat das **Bild der Wissenschaft entscheidend geprägt**. Dies liegt insbesondere an den Entdeckungen und Entwicklungen durch **Galileo Galilei**, **Johannes Kepler** und nicht zuletzt durch **Isaac Newton**, der auch durch seine neuen mathematischen Methoden - wie die Infinitesimalrechnung - den Bereich der Mathematik weiterentwickelte. Damit wir den Stand der Wissenschaft der damaligen Zeit besser verstehen können, ist es notwendig, die Eigenschaften der Newtonschen Mechanik und deren Folgerungen und Konsequenzen für das damalige Weltbild zu kennen. Darauf werden wir im folgenden eingehen.

5.1 Invarianz gegenüber Galileitransformationen

Um physikalische Vorgänge beschreiben zu können, ist es oftmals notwendig ein Koordinatensystem zu wählen, wobei man durch die Wahl dieses Systems stets versucht, die Vorgänge möglichst einfach darzulegen. Im Sinne der Newtonschen Mechanik sind dies die sogenannten Inertialsysteme, d.h. solche Systeme, die in einem Zustand der gleichförmigen Bewegung und somit nicht beschleunigt sind.

Hat man die Koordinaten $\vec{x}$ und die Zeit t im Inertialsystem IS gegeben, so erhält man alle weiteren möglichen $\vec{x'}$ und t' der Inertialsysteme IS' durch die sogenannte **Galileitransformation**:

$$\text{(GT)} \qquad \vec{x'} = A\vec{x} + \vec{v}t + \vec{x_o} \quad \text{und} \quad t' = t\ ,$$

wobei A eine konstante Drehmatrix, $\vec{v}$ eine konstante Geschwindigkeit und $\vec{x_o}$ eine konstante räumliche Translation des Koordinatenursprungs darstellt.

Die Überprüfung der Newtonschen Axiome ergibt sich aus der zweimaligen Ableitung der Ortskoordinaten der Galileitransformation (GT), es folgt:

$$\vec{\ddot{x}'} = A\,\vec{\ddot{x}} \quad \text{und} \quad t' = t\ .$$

Die konstante Drehung durch die Matrix A beeinflußt die Newtonschen Axiome nicht, da man nach der Transformation ins Inertialsystem IS' durch Multiplikation mit der Inversen von A wieder die ursprüngliche Form der Newtonschen Axiome erhält. Damit hat man nun alle möglichen Inertialsysteme der Newtonschen Mechanik gefunden, es sind also alle Systeme, die sich relativ zueinander mit konstanter Geschwindigkeit bewegen und eventuell noch konstant gegeneinander verdreht sind.

Es scheiden jedoch zum Beispiel solche Systeme aus, die sich gegenüber einem ruhenden Koordinatensystem konstant drehen. Um auch solche Vorgänge, wie ein sich drehenden Kreisel oder ein Karussell, beschreiben zu können, muß man in der Newtonschen Mechanik **Hilfskräfte** oder sogenannte **Scheinkräfte** einführen. Diesen Tatbestand werden wir gleich noch eingehender betrachten.

5.2 Absoluter Raum

Wir haben gesehen, daß es eine Fülle von **Inertialsystemen** gibt, in denen die **Newtonschen Axiome** gelten. Alle diese erweisen sich als **invariant gegenüber Galileitransformationen** untereinander. Dies hat jedoch eine weitreichende physikalische Konsequenz:

> Wir können durch ein mechanisches Experiment im Sinne der Newtonschen Axiome **nicht feststellen**, welches Inertialsystem sich im Zustand der **absoluten Ruhe** befindet.

Daher haben wir auch keine Möglichkeit, absolute Bewegung zu messen. Newton hat dieses Problem erkannt und sprach daher von einem **absoluten** und einem **relativen Raum**.

"Der absolute Raum bleibt vermöge seiner Natur und ohne Beziehung auf einen äußeren Gegenstand stets gleich und unbeweglich. Der relative Raum ist ein Maß oder ein beweglicher Teil des ersten, welcher von unseren Sinnen durch seine Lage gegen andere Körper bezeichnet und gewöhnlich für den unbeweglichen Raum genommen wird."[49]

[49] Mach, S. 220

Dennoch war er der Ansicht, daß man im Gegensatz zu den gleichförmigen Bewegungen eine **absolute Beschleunigung** ermitteln könne, dies beschreibt Bernstein wie folgt:

"*Er* [Newton] *verstand unter Beschleunigung etwas ganz anderes. Wenn wir beschleunigt werden,* ***fühlen*** *wir es - wir werden gestoßen oder gezogen - und daher ließe sich vernünftigerweise behaupten, daß wir Beschleunigungen messen können, sogar im 'leeren' Raum, in einem absoluten Sinn.*

Newtons am häufigsten diskutierte Beispiele hatten mit Rotationen zu tun. Man stelle sich z. B. vor, daß wir zwei durch eine Schnur verbundene Gewichte um einen Mittelpunkt in Rotation versetzen. Die einfache Erfahrung zeigt, daß jedes Gewicht an der Schnur ziehen wird. Man würde meinen, und Newton tat das auch, der Spannungsbetrag in der Schnur ließe sich zur Messung der ***absoluten Beschleunigung*** *dieser rotierenden Gewichte im leeren Raum benützen. All das erscheint durchaus vernünftig, bis man die Kräfte analysiert, die, vom Newtonschen Standpunkt aus, auf die betreffenden Körper wirken müssen, um die beobachtete Rotation zu erzeugen. Ein besonders gutes Beispiel für die Zusammenhänge gibt uns die stationäre Umlaufbahn der synchronen Satelliten, die als Relais für Radiosignale benützt werden. Es ist bekannt, daß man, um einen Satelliten z. B. in eine Umlaufbahn parallel zum Erdäquator zu bringen, so verfahren muß, daß vom Nordpol aus gesehen der Rotationsbetrag des Satelliten genau jenem Betrag gleicht, mit dem ein Punkt auf dem Äquator um den Pol rotiert. Daher schwebt vom Äquator aus gesehen der Satellit in einer festen Position über dem Äquator. Wer nun den Satelliten vom Äquator aus betrachtet, wird entsprechend Newtons Ansicht zu dem Schluß kommen, daß, da der Satellit keine Beschleunigung aufweist - er bleibt einfach stehen - nach Newtons Gesetz keine Kraft auf ihn einwirkt. Wir wissen jedoch, daß die Schwerkraft den Satelliten* ***nach unten*** *zieht, und ein Newtonianer wäre daher gezwungen, eine entgegenwirkende Kraft anzunehmen, die den Satelliten* ***nach oben*** *zieht, welche die Gravitationskraft genau ausgleicht* [Satzstellung geändert]. *In manchen Unterrichtsbüchern gibt man dieser Kraft sogar einen Namen. Man nennt sie 'Zentrifugalkraft'.*"[50]

In einigen Büchern werden solche Kräfte Scheinkräfte genannt und eine Begründung dafür angegeben:

"*Sie heißen so, weil sie nur in Nicht-Inertialsystemen auftreten, weil sie dort gewissermaßen die Newton-Mechanik 'in Ordnung bringen'. Sie sorgen dafür, daß ein kräftefreier Massenpunkt im Nicht-Inertialsystem ... eine solche* ***Scheinkraft*** *erfährt, daß er vom Inertialsystem ... aus gesehen eine geradlinig gleichförmige Bewegung ausführt.*"[51]

Dieser Begriff der Scheinkraft ist aber nicht so glücklich gewählt, da man die sogenannten Scheinkräfte, wie die Zentrifugalkraft, recht real zu spüren bekommt, z. B.

[50] Bernstein, S. 112-113, eine Satzstellung wurde zum physikalisch Sinnvollen abgeändert, Hervorhebung im Original

[51] Nolting, Band I, S. 125

beim Kettenkarussell, bei dem man "nach außen fliegt". Darauf weisen auch manche Buchautoren hin und nennen die im Nicht-Inertialsystem auftretenden zusätzlichen Kräfte auch **Trägheitskräfte**, weil "*die recht komplizierten Scheinkräfte ... nichts anderes zu bedeuten* [haben], *als daß durch sie die Bewegung eines kräftefreien Massenpunktes vom Nicht-Inertialsystem ... aus gesehen gerade so kompliziert verläuft, daß sie vom Inertialsystem ... aus geradlinig ist.*"[52] Diese Scheinkräfte bleiben, obwohl man als Physikstudent mit diesen umzugehen lernt, einem tieferen Verständnis oftmals verborgen und so bleibt manchmal ein leichtes Unbehagen zurück.[53] Dies hat aber auch seinen guten Grund. Dazu schreibt Bernstein:

"*Die Zentrifugalkraft scheint im Gegensatz zu anderen physikalischen Kräften nicht mit einer Beeinflussung eines bestimmten Objekts durch andere benachbarte Objekte verbunden zu sein. Die Gravitationskraft kommt durch die Nachbarschaft materieller Körper zustande; elektrische Kräfte werden durch die Gegenwart elektrisch geladener Objekte erzeugt; und so fort. Aber die Zentrifugalkraft scheint durch die Beziehung eines Objekts zum leeren Raum erzeugt zu werden. In seiner Arbeit von 1916 über die allgemeine Relativität gibt Einstein eine anschauliche Darstellung dieser eigentümlichen Situation. Er stellt sich einen Raum vor, in dem zwei an Art und Größe identische Kugeln aus irgendeinem verformbaren Stoff schweben. Nach der Newtonschen Physik können wir uns eine Situation denken, in der die eine Kugel zu einem Ellipsoid verformt wird, während die andere Kugel ganz sphärisch bleibt, auch wenn beide Kugeln dem Einfluß anderer äußerer Objekte ganz entzogen sind und obwohl sie den gleichen Einfluß aufeinander haben: das ist die Situation, in der eine Kugel so gedreht wird, daß sie auf einer Achse rotiert, während die andere in Ruhe bleibt. Die rotierende Kugel wird sich durch die ihr widerfahrenden 'zentrifugalen Kräfte' ausbauchen - das würde jedenfalls der Newtonianer behaupten. Doch wenn man ihn fragte, was denn nun die Ursache der Zentrifugalkraft sei, könnte der Newtonianer nur eine einzige Antwort geben: die Rotation der Kugel gegenüber dem leeren oder absoluten Raum. Tatsächlich werden in den genannten Physikbüchern diese Zentrifugalkräfte oft als fiktive, also frei erfundene Kräfte erwähnt, da sie, wenn das rotierende System einmal zur Ruhe gebracht ist, einfach verschwinden. Man kann fragen, warum es überhaupt notwendig ist, solche Kräfte einzuführen. Vom Newtonschen Standpunkt her ist die Antwort ganz klar - ohne sie ist nämlich Newtons Gesetz der Beziehung von Kraft zu Beschleunigung falsch. Das läßt sich sehr anschaulich am Beispiel der oben erwähnten synchronen Satelliten darstellen. Die einzige 'wirkliche' Kraft, die auf den Satelliten wirkt, ist die Schwerkraft, und daher würde, wenn die Zentrifugalkraft nicht eingeführt worden wäre, Newtons Gesetz vorhergesagt haben, daß der Satellit auf die Erde fallen müßte, was der Erfahrung widerspricht.*"[54]

Diese und weitere Probleme in der Newtonschen Mechanik wurden sehr bald auch von Kritikern erkannt. Am bekanntesten von diesen wird wohl **Ernst Mach** sein, der

[52] Nolting, Band I, S. 127

[53] Diese Meinung vertritt Bernstein, welche man in Bernstein, S. 113 findet

[54] Bernstein, S. 113-114

in seinem Buch über die Mechanik versucht, "*die Physik von dem, was er als 'Metaphysik' empfand, zu befreien; darunter verstand er alles, was nicht direkt mit dem Sinn für Erfahrung verbunden werden konnte.*"[55] So kam **Mach** bezüglich der Newtonschen Auffassung der Mechanik zu einigen **kritischen Stellungnahmen**:

> "*Über den absoluten Raum und die absolute Bewegung kann niemand etwas aussagen, sie sind bloße Gedankendinge, die in der Erfahrung nicht aufgezeigt werden können. Alle unsere Grundsätze der Mechanik sind ... Erfahrungen über relative Lagen und Bewegungen der Körper. ... Während aber Galilei in seiner Fluttheorie in ganz naiver Weise die ruhende Fixsternsphäre zum neuen Koordinatensystem wählt, bemerken wir bei Newton Zweifel, ob ein gegebener Fixstern nur scheinbar oder wirklich ruht ... . Dies scheint ihm auch die Schwierigkeiten zu bedingen, zwischen wahrer* [absoluter] *und scheinbarer* [relativer] *Bewegung zu unterscheiden. Dadurch war er auch gedrängt, den Begriff des absoluten Raumes zu statuieren. Indem er sich weiter in dieser Richtung bemüht, den Versuch der rotierenden, durch einen Faden verbundenen Kugeln und jenen des rotierenden Wassergefäßes diskutiert ... , glaubt er zwar keine absolute Translation, wohl aber eine absolute Rotation konstatieren zu können.*[56] *Wenn noch immer moderne Autoren durch die Newtonschen, vom Wassergefäß hergenommenen Argumente sich verleiten lassen, zwischen relativer und absoluter Bewegung zu unterscheiden, so bedenken sie nicht, daß das Weltsystem uns nur einmal gegeben, die ptolemäische oder kopernikanische Auffassung aber unsere Interpretationen, aber beide gleich wirklich sind. Man versuche das Newtonsche Wassergefäß festzuhalten, den Fixsternhimmel dagegen zu rotieren und das Fehlen der Fliehkräfte nun nachzuweisen.*"[57]

Daher, so Mach, können die mechanischen Grundsätze so gefaßt werden, daß sich auch für Relativdrehungen Zentrifugalkräfte ergeben.[58] Wir sehen, daß eine genauere und eingehendere Betrachtung der Newtonschen Mechanik einige Fragen aufwirft, die man nicht so einfach beantworten kann. Diese zeigt ebenso, daß man eine Theorie nicht einfach als etwas Absolutes oder gar Wahres annehmen kann; sie bleibt eine Theorie, die, um in Einsteins Worten zu sprechen, "*freie Erfindungen des menschlichen Geistes*"[59] sind. Dies ist auch der Standpunkt, den Mach sehr deutlich vertrat. So schreibt er:

> "*Das wichtigste Ergebnis unserer Betrachtungen ist aber, daß gerade die scheinbar einfachsten mechanischen Sätze sehr komplizierter Natur sind, daß sie auf unabgeschlossenen, ja sogar auf nie vollständig abschließbaren Erfahrungen beruhen, daß sie zwar praktisch hinreichend gesichert sind, um mit Rücksicht auf die genügende Stabilität unserer Umgebung als Grundlage der mathematischen Deduktion zu dienen, daß sie aber keineswegs selbst als mathematisch ausgemachte*

[55] Bernstein, S. 115
[56] Mach, S. 222-223
[57] Mach, S. 222
[58] Diese Interpretation findet man in Mach, S. 226
[59] Bernstein, S. 24

Wahrheiten angesehen werden dürfen, sondern vielmehr als Sätze, welche einer fortgesetzten Erfahrungskontrolle nicht nur fähig, sondern sogar bedürftig sind."[60]

Das Problem der Zentrifugalkraft wurde von Mach dahingehend gelöst, daß ferne Materie im Universum Einfluß auf beschleunigte Objekte hat.

"*Seine Formulierung ist dann als das Machsche Gesetz bekannt geworden. Mach verabschiedete insbesondere Newtons isoliert rotierenden Körper, weil es, wie er sagte, im gegenwärtigen Universum so etwas wie isolierte Körper nicht gebe und man daher tatsächlich Wirkungen ferner Sterne nicht ausschließen könne. Niemand hatte einen experimentellen Beweis dafür, wie sich ein Körper - eine der Kugeln Einsteins - verhalten würde, der in einem leeren Universum rotiert, denn so weit wir betroffen sind, gibt es so etwas wie ein leeres Universum nicht.*"[61]

5.3 Newtonscher Zeitbegriff

Das Newtonsche Verständnis der Zeit haben wir schon in der Formulierung der **Galileitransformation** kennengelernt, wobei die **Zeit für alle Inertialsysteme gleich** war. Darin zeigt sich Newtons Interpretation der Zeit als eine absolute Größe, die überall und jederzeit gültig ist. Newton drückte seine Ansichten folgendermaßen aus:

"*Die absolute, wahre und mathematische Zeit verfließt an sich und vermöge ihrer Natur gleichförmig und ohne Beziehung auf irgendeinen äußeren Gegenstand. Sie wird auch mit dem Namen Dauer belegt. ... Die relative, scheinbare und gewöhnliche Zeit ist ein fühlbares und äußerliches, entweder genaues oder ungleiches Maß der Dauer, dessen man sich gewöhnlich statt der wahren Zeit bedient, wie Stunde, Tag, Monat, Jahr. ... Die natürlichen Tage, die gewöhnlich als Zeitmaß für gleich gehalten werden, sind nämlich eigentlich ungleich. Diese Ungleichheit verbessern die Astronomen, indem sie die Bewegung der Himmelskörper nach der richtigen Zeit messen. Es ist möglich, daß keine gleichförmige Bewegung existiert, durch welche die Zeit genau gemessen werden kann, alle Bewegungen können beschleunigt oder verzögert werden; allein der Verlauf der absoluten Zeit kann nicht geändert werden. Dieselbe Dauer und dasselbe Verhalten findet für die Existenz aller Dinge statt, mögen die Bewegungen geschwind, langsam oder Null sein.*"[62]

Auch in diesem Verständnis, einer absoluten Zeit, wurde Newton von Mach kritisiert:

"*Es scheint, als ob Newton bei den eben angeführten Bemerkungen noch unter dem Einfluß der mittelalterlichen Philosophie stünde, als ob er seiner Absicht, nur das Tatsächliche zu untersuchen, untreu würde.*"[63]

---

60 Mach, S. 231
61 Bernstein, S. 116
62 Mach, S. 216-217
63 Mach, S. 217

Diese Kritik führt Mach im folgenden dann auch näher aus:

"*Wir sind ganz außerstande, die Veränderungen an der Zeit zu messen. Die Zeit ist vielmehr eine Abstraktion, zu der wir durch die Veränderung der Dinge gelangen, weil wir auf kein bestimmtes Maß angewiesen sind, da eben alle untereinander zusammenhängen. Wir nennen eine Bewegung gleichförmig, in welcher gleiche Wegzuwüchse gleichen Wegzuwüchsen einer Vergleichsbewegung ... entsprechen. Eine Bewegung kann gleichförmig sein in bezug auf eine andere. Die Frage, ob eine Bewegung an sich gleichförmig sei, hat gar keinen Sinn. Ebensowenig können wir von einer 'absoluten Zeit' (unabhängig von jeder Veränderung) sprechen. Diese absolute Zeit kann an gar keiner Bewegung abgemessen werden, sie hat also auch gar keinen praktischen und auch keinen wissenschaftlichen Wert, niemand ist berechtigt zu sagen, daß er von derselben etwas wisse, sie ist ein müßiger 'metaphysischer' Begriff.*[64] *Zur Vorstellung der Zeit gelangen wir durch den Zusammenhang des Inhalts unseres Erinnerungsfeldes mit dem Inhalt unseres Wahrnehmungsfeldes, wie wir kurz und allgemein verständlich sagen wollen. Wenn wir sagen, daß die Zeit in einem bestimmten Sinne abläuft, so bedeutet dies, daß die physikalischen (und folglich auch die physiologischen) Vorgänge sich nur in einem bestimmten Sinne vollziehen.*[65] *So wie wir eine der Wärmeempfindungen nahe parallel gehende, willkürlich gewählte (thermometrische) Volumenanzeige, welche nicht den unkontrollierbaren Störungen des Empfindungsorgans unterliegt, beim Studium der Wärmevorgänge als Temperaturmaß vorziehen, so bevorzugen wir aus analogen Gründen eine der Zeitempfindung nahe parallel gehende, willkürlich gewählte Bewegung (Drehungswinkel der Erde, Weg eines sich selbst überlassenen Körpers) als Zeitmaß.*"[66]

Dennoch ist auch Mach nicht vollständig von der Idee einer absoluten Zeit abgeneigt und weist in diesem Zusammenhang auf eines seiner Bücher hin ("Prinzipien der Wärmelehre"):

"*Die für den Temperaturbegriff daselbst gegebenen Ausführungen lassen sich unschwer auf den Zeitbegriff übertragen und machen die Entstehung von Newtons 'absoluter Zeit' verständlich. Auch auf den Zusammenhang des Entropiebegriffs mit der Nichtumkehrbarkeit der Zeit wird daselbst ... hingewiesen und die Ansicht ausgesprochen, daß die Entropie des Weltalls, wenn sie überhaupt bestimmt werden könnte, wirklich eine Art absoluten Zeitmaßes darstellen würde.*"[67]

Der **Zeitbegriff** ist **nichts Selbstverständliches**, wie man es sonst üblicherweise gewohnt ist. Dieser Eindruck der Selbstverständlichkeit wird heutzutage dadurch unterstützt; daß fast jeder eine Uhr oder, anders gesagt, ein Vergleichsbewegungszeitmeßgerät mit sich herumträgt, ohne darüber nachgedacht zu haben, daß man **Zeit direkt nicht messen kann**, sondern nur auf indirektem Wege, indem man sich über

64 Mach, S. 217
65 Mach, S. 218
66 Mach, S. 219
67 Mach, S. 219

wiederkehrende Vorgänge ein Zeitmaß geschaffen hat. Heutzutage wird das Zeitmaß, eine Sekunde, mittels einer Absorptionsfrequenz des Cäsium-133 festgelegt.[68]

5.4 Folgerungen aus der Newtonschen Mechanik

Nun mag man vielleicht fragen, welche Konsequenzen alle vorher genannten Eigenschaften und Probleme in Bezug auf die Frage nach dem richtigen Weltbild unseres Sonnensystems haben. Die wohl auffälligste Folgerung ergibt sich aus der **Galileiinvarianz der Newtonschen Axiome der Mechanik**.

> "*Diese Eigenschaft bedeutet, daß Newtons Bewegungsgesetze für alle Körper gleich sind, egal wie schnell sie relativ zueinander bewegt sind ... . Es folgt, daß es keinen mechanischen Weg gibt, die absolute Bewegung von jemand zu entdecken.*[69] *Es gibt kein Experiment, welches jemand anstrengen könnte, um zu erfahren, welches Bezugssystem 'wirklich' in Ruhe und welches in Bewegung ist. Somit gibt es keinen Weg, ein besonderes Bezugssystem als absolut ruhend auszusondern.*"[70]

Newton schloß sogar ein, daß es auch der Fall sein kann, "*daß kein wirklich ruhender Körper existiert, auf welchen man die Orte und Bewegungen beziehen könnte.*"[71] Daher wollen wir nun das Folgende als **Newtonsches Relativitätsprinzip** verstehen:

(NR) Absolute Ruhe oder Bewegung von irgendeinem Objekt innerhalb eines isolierten Systems kann nicht durch mechanische Experimente innerhalb des Systems gemessen werden; nur Bewegung, die relativ zu anderen Objekten abläuft, kann gemessen werden.

Aus dem Newtonschen Relativitätsprinzip folgt nun sogleich, daß man **auf Grund von mechanischen Experimenten nicht entscheiden kann**, ob die heliozentrische oder geozentrische Sichtweise unseres Sonnensystems die "richtige" ist. Es ist sogar inkonsistent, wenn man fordert, daß das Newtonsche Relativitätsprinzip gültig ist, und zugleich behauptet, daß die Sonne im Zentrum des Sonnensystems steht. Aus dem Blickwinkel der einfacheren Beschreibung läßt sich sicherlich die heliozentrische

68 Nachzulesen in Gerthsen, S. 6

69 "This property means that Newton's Laws of Motion are the same for all bodies, no matter how fast they are moving relative to each other ... . It follows that there is no mechanical way of detecting one's absolute motion." Harré, S. 117

70 "There is no experiment one can do to tell which frame is 'really' at rest and which is moving. Thus there is no way to single out one particular reference frame as being at absolute rest." Giancoli, S. 609

71 Mach, S. 220

Beschreibung vorziehen. Nicht zuletzt auch deswegen, weil man sich dies einfacher vorstellen kann. Betrachtet man das Sonnensystem als isolierten Teil im Universum, so kann man berechnen, daß sich der Schwerpunkt in unserem Sonnensystem zeitweise in der Nähe und zeitweise leicht außerhalb der Sonne befindet. Somit ist es zunächst auch physikalisch sinnvoll, bei isolierter Betrachtung des Sonnensystems, alle Bewegungen der Planeten von der Sonne aus zu beschreiben. Dies führt jedoch im Newtonschen Sinne nicht dazu, deren Richtigkeit daraus schließen zu können.

Es bleibt lediglich die Tatsache, "*daß die Bewegungen der Planeten viel einfacher sind, wenn man annimmt, daß diese um die Sonne statt um die Erde kreisen.*"[72] Ebenso kommen Holton und Brush zu dem Resultat, daß

> "*abgesehen von der besonderen Einfachheit sich keine ausschlaggebenden wissenschaftlichen Vorteile gegenüber der geozentrischen Astronomie offenbarten, es gab keine wichtige Beobachtung, welche nur durch die eine und nicht durch die andere* [Theorie] *erklärbar war, kein Experiment, um dies in einer klar trennenden Entscheidung gegenüberzustellen.*"[73]

Jedoch fehlt eine adäquate geozentrische Theorie, die analog zum Keplerschen Weltbild, der Ellipsenbahnen der Planeten um die Sonne, die Bewegungen der Planeten und die Bewegung der Sonne von der Erde aus beschreibt und diesem bezüglich der relativen Bewegung äquivalent ist, so wie das Kopernikanische Weltbild dem Weltbild von Brahe bezüglich relativer Bewegungen entsprach. Dies sollte jedoch kein Hinderungsgrund sein, da wir auf der Basis der Newtonschen Mechanik nicht entscheiden können, ob die Keplerschen Bewegungen der Planeten nun tatsächlich um die Sonne verlaufen, ob diese um die Erde stattfinden oder sogar völlig anders aussehen.

Eine weitere nennenswerte Konsequenz der **Newtonschen Mechanik** ist die resultierende **Deterministik**. Wenn einmal, entsprechend dieser Mechanik, Kräfte und Anfangsbedingungen genau bestimmt sind, kann man die Bewegungen der Objekte bis in eine unbestimmte Zukunft berechnen. Mit anderen Worten: der gesamte zukünftige Kurs des Universums steht fest und ist auch, wenigstens prinzipiell, berechenbar, wenn wir seinen gegenwärtigen Zustand und die Kräfte kennen.[74] Auch der

[72] "...that the motions of the planets were much simpler if they were considered to be circling about the sun rather than the earth." Hewitt, S. 137

[73] "... apart from its powerful simplicity it offered ... no other overruling *scientific* advantages over their geocentric astronomy ... , there was then no important observation which was explainable only by one and not by the other, no experiment to pit in a clear-cut decision." Holton, S. 28

[74] Dies erwähnt auch Bernstein, S. 32-33

französische Mathematiker und Physiker **Marquis Pierre Simon Laplace** schrieb diesbezüglich:

> *"Wir müssen den gegenwärtigen Zustand des Universums als die Auswirkung seines vorherigen Zustands betrachten und als die Ursache dessen, der ihm folgen wird. Eine Intelligenz, der in einem bestimmten Augenblick alle Kräfte bekannt wären, welche die natürliche Welt und die jeweiligen Standpunkte der Wesen, die sie zusammensetzen, regieren, könnte, falls sie außerdem noch bedeutend genug wäre, alle diese Informationen zu analysieren, in einer einzigen Formel die Bewegungen der größten Körper des Universums und jene der leichtesten Atome zusammenfassen: nichts wäre für sie ungewiß, und Zukunft und Vergangenheit wären bei ihrer Beobachtung unmittelbar gegenwärtig."*[75]

Da die Newtonsche Mechanik die Keplerschen Gesetze bestätigte und zudem eine Deterministik besonderer Art lieferte, ist es durchaus verständlich, daß man eine **geozentrische Sichtweise mehr und mehr ins Abseits** stellte. Denn

> *"in Anbetracht des ungeheuren Erfolges der Newtonschen Mechanik in der Beschreibung der Bewegungen von Planeten bis zu Kanonenkugeln wundert man sich kaum darüber, daß die Physiker, etwas unkritisch, dazu neigten, diese Theorie als das letzte Wort und die endgültige Norm wissenschaftlicher Erklärung zu akzeptieren."*[76]

Es ist nicht leicht sich ein geozentrisches Weltbild vorzustellen, da man bei der heliozentrischen Sichtweise unser Sonnensystem isoliert betrachten kann. Hingegen verlangt eine geozentrische Sichtweise, das Sonnensystem innerhalb der Gesamtheit des Universums zu betrachten, welches einer umfangreichen Theorie bedarf.

5.5 Zusammenfassung

Selbst diese Erkenntnis, daß die geozentrische Beschreibung schwieriger als die heliozentrische ist, kann nicht dazu führen, entweder **Geozentrismus** oder **Heliozentrismus** als unphysikalisch zu verwerfen. Wir sehen auch, daß die Frage nach dem richtigen Weltbild mit dem **grundsätzlichen physikalischen Verständnis von Raum und Zeit** zusammenhängt. Auf der Suche nach einem Kriterium auf der Grundlage der experimentellen Physik, werden wir nun versuchen, in einigen Ausschnitten den Weg der Wissenschaftler der nachfolgenden Generationen nachzuvollziehen. Nach der Zeit von Newton wurden viele Experimente angestrengt, um ein physikalisches Kriterium

[75] Laplace, Essai philosophique sur les probabilités, 1814, S. 3 in Bernstein, S. 33
[76] Bernstein, S. 33

zwischen Heliozentrismus und Geozentrismus zu finden. Dazu werden wir im folgenden Kapitel einige Experimente betrachten, die auch nichtmechanische Phänomene enthalten, welches die **elektromagnetische Wechselwirkung** ist.

6 Einige entscheidende Experimente

In diesem Kapitel betrachten wir einige Experimente und Beobachtungen, die gemacht wurden, um ein Kriterium zur Favorisierung des Geozentrismus oder Heliozentrismus zu erhalten. Dabei geht es oft nur um die Frage, ob sich die Erde durch den Raum bewegt oder nicht. Die Wissenschaftler der vergangenen Jahrhunderte haben sich den **"lichtleitenden Äther"** als Medium für den Lichttransport vorgestellt; ähnlich wie beim Schall, der sich im Medium Luft ausbreitet. Für uns im 20. Jahrhundert erscheint die Forderung nicht notwendig zu sein, daß sich Licht im Äther ausbreiten soll. Dies liegt aber zunächst daran, daß heutzutage kaum noch über die Vorstellungen und Probleme der Wissenschaftler vergangener Jahrhunderte gelehrt und nachgedacht wird. Der Inhalt heutiger Lehrbücher wird allzu oft unkritisch und als unantastbares Wissensgut von den Lernenden übernommen.

Im folgenden werden wir einige wichtige Experimente herausgreifen, die zu einigen Herausforderungen der Wissenschaft des 19. Jahrhunderts führen werden. Um die Gedankengänge und Vorstellungen besser zu verstehen, müssen wir bedenken, daß man bis zu Beginn des 20. Jahrhunderts Raum und Zeit als absolut und voneinander unabhängig betrachtete, die **Relativitätstheorie von Einstein** war noch nicht entwikkelt. In der Zeit nach Newton gab es die Newtonsche Mechanik und eine korpuskulare Vorstellung vom Licht, wie dies Newton vertreten hatte, die aber nach und nach durch eine **Wellenvorstellung**, besonders von **Young** vertreten, abgelöst wurde.

6.1 Stellare Aberration

Im Jahre 1725 beobachteten **James Bradley** (1693-1762) und **Samuel Molyneux** den **Stern Gamma Draconis** mit einem eigens dafür konstruierten Fernrohr. Sie hatten sich als Ziel gesteckt, die **stellare Parallaxe** zu messen (siehe Abbildung 14), welches die Veränderung des Beobachtungswinkels in Abhängigkeit der Position der Erde im Raum ist, um einen Beweis dafür zu liefern, daß sich die Erde um die Sonne bewegt. Da die heliozentrische Theorie davon ausgeht, daß die Sonne der zentrale Körper unseres Sonnensystems ist und die Erde sich um diese bewegt, müßte man, so die Kritiker des Heliozentrismus, eine Veränderung des Beobachtungswinkels während eines Jahres feststellen können. Die Verteidiger hatten demgegenüber das Fehlen

dieser Beobachtung dadurch erklärt, daß der Bahnradius der Erde um die Sonne im Vergleich zum Abstand der Erde zu den Sternen viel zu gering sei, um den geforderten Effekt messen zu können.[77] Diese stellare Parallaxe wurde erst 1838 von **Friedrich Wilhelm Bessel** gemessen, da die Winkelabweichung durch die stellare Parallaxe sehr gering ist.

Da man nur die Änderung der stellaren Parallaxe messen kann, markierten Bradley und Molyneux im Dezember 1725 einen Referenzpunkt an der Fernrohreinstellung. Im Laufe der nächsten Monate beobachtete Bradley durch das Fernrohr, welches durch das Dach eines Hauses in der Nähe von London ragte, wie der anvisierte Stern Gamma Draconis bis zum März in südliche Richtung wanderte, danach umkehrte und bis September nun nordwärts wanderte und anschließend wieder zum Referenzpunkt im Dezember zurückkehrte. Diese Maximaldurchgänge im März (südlichster Durchgang) und im September (nördlichster Durchgang) ließen sich nicht mit der stellaren Parallaxe vereinbaren, da sonst im Juni die größte Abweichung zu erwarten gewesen wäre.

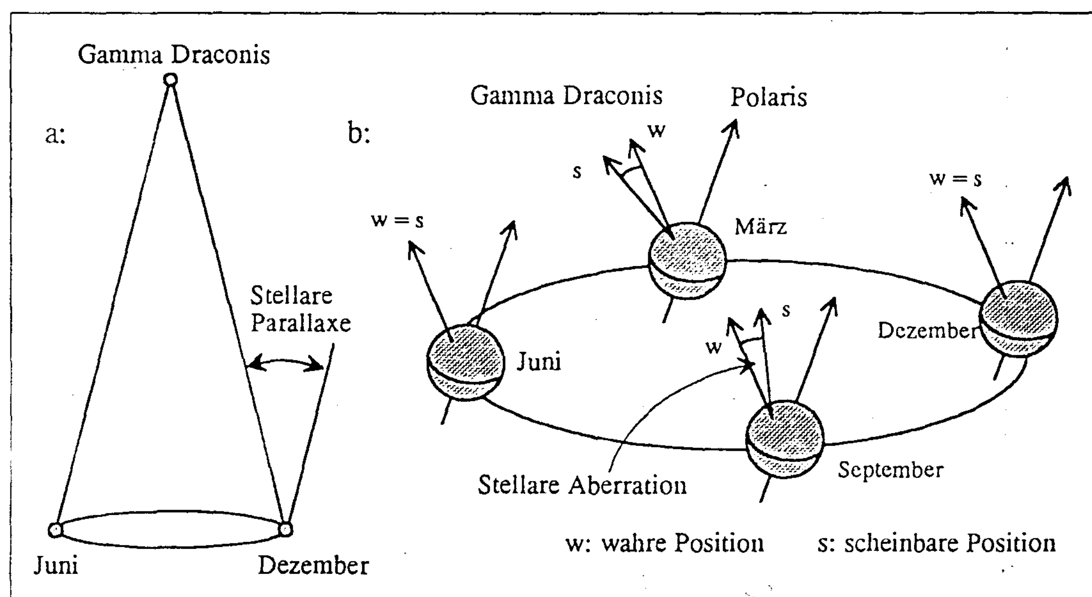


Abbildung 14 Links: Veränderung des Beobachtungswinkels in Abhängigkeit der Position der Erde im Raum, stellare Parallaxe (a). Rechts: Veränderung des Beobachtungswinkels in Abhängigkeit von der momentanen Bewegungsrichtung der Erde, stellare Aberration (b)

Dies veranlaßte Bradley nun, noch weitere Sterne zu beobachten, wobei er ein neues Fernrohr benötigte, welches nun im Gegensatz zum ersten einen weitaus größeren Beobachtungsbereich und dennoch eine doppelte Meßgenauigkeit besaß. Dabei stellte er

[77] Eine Darstellung der Entdeckung der stellaren Aberration findet man in Stewart, S. 101

fest, daß die Größe der Abweichung der Nord-Süd-Richtung abnahm, wenn er Sterne beobachtete, die näher an der Bahnebene der Erde um die Sonne lagen (d.h. näher an der Ekliptik).

Im Jahre 1728 hatte Bradley schließlich seine Beobachtungen entschlüsselt und veröffentlichte seine Forschung, die als **stellare Aberration** bekannt geworden ist. Wenn Licht in ein Teleskop fällt, welches mit der Erde in Bewegung durch den Äther ist, so kommt der Lichtstrahl, der zentral ins Teleskop fällt, aufgrund der endlichen Lichtgeschwindigkeit durch die Bahnbewegung der Erde leicht von Zentrum ab. Um diese Abweichung des Lichtes auf dem Weg durch das Teleskop zu korrigieren, muß man das Teleskop von der Ausrichtung zum Sternenort wegkippen. Dadurch erscheint der Stern an einer anderen Position als er tatsächlich ist. Diese Abweichung bezeichnet man als stellare Aberration und wird in Abbildung 15 anschaulich erläutert.

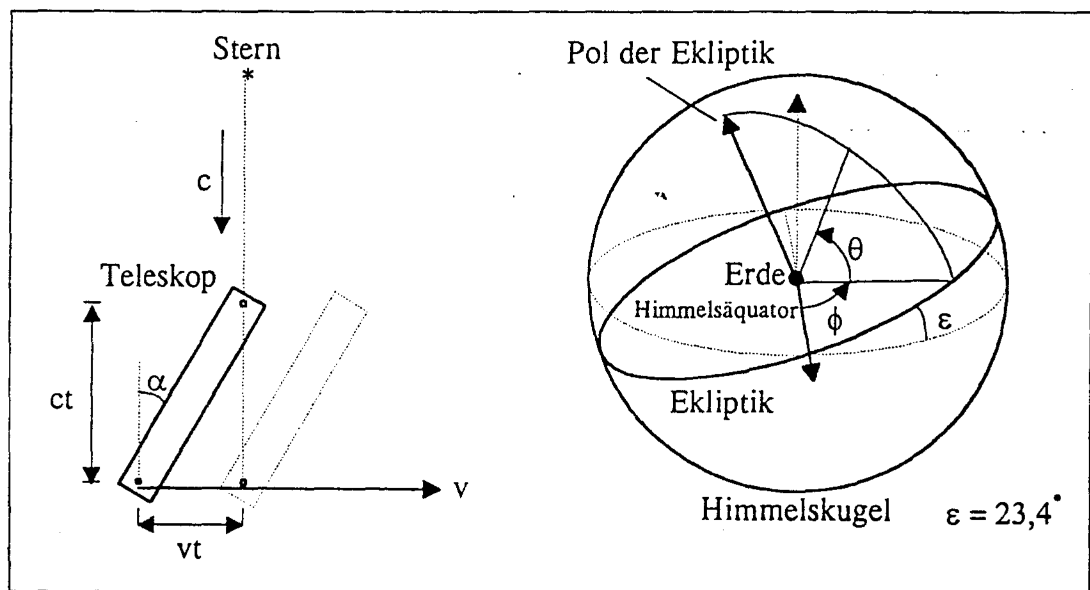


Abbildung 15 Links: Stellare Aberration durch Bewegung des Teleskops. Rechts: Prinzipieller Aufbau des geozentrischen Ekliptiksystems[78]

Im Laufe eines Jahres wandert die scheinbare Position entlang einer Ellipsenbahn um die wahre Position. Zusätzlich ist das Wegkippen des Fernrohres vom Breitengrad θ des Sternes bezüglich der Ekliptikebene abhängig. Wenn ein Stern am Pol der Ekliptik steht, so befindet sich die Linie Stern-Erde senkrecht auf der Ekliptikebene, wodurch die volle Geschwindigkeitskomponente der Erde zur Aberration beiträgt. Steht ein Stern unter einem Winkel θ ($0° < \theta < 90°$) von der Ekliptikebene, also nicht am

[78] Links stehende Abbildung frei gezeichnet nach Giancoli, S. 614, Abb. 25-3

Ekliptikpol, so trägt nur noch der Teil der Geschwindigkeitskomponente der Erde zur Aberration bei, der senkrecht auf der Verbindungslinie Stern-Erde liegt, d.h. $v_A = v \cdot \sin\theta$. Liegt ein Stern in der Ekliptikebene, d.h. $\theta = 0°$, so beobachtet man keine Aberration.[79]

Ursprünglich wurde dieses Experiment mit Hilfe der korpuskularen Vorstellung des Lichtes erklärt, da man aber von dieser Vorstellung abkam, wurde dieses durch die Wellenvorstellung unter Mithilfe der durch das Äther strömenden Erde abgelöst. Dieses Experiment und dessen Erklärung durch den Lauf der Erde um die Sonne war eine wesentliche Unterstützung des heliozentrischen Weltbildes. Allerdings konnte man aus diesem Experiment nur ableiten, daß die **Relativbewegung** der Erde zum Fixsternhimmel auf die beschriebene Art verläuft, wobei es aber sein könnte, daß die sogenannten Fixsterne jene beobachtete Bewegung vollführen und die Erde ruht. Auf Grund des **Newtonschen Relativitätsprinzips** läßt sich vom Experiment her nicht unterscheiden, welches Objekt nun wirklich jene beobachtete Bewegung vollführte. Fast ein Jahrhundert später versuchte ein weiterer Experimentator diese Frage zu entscheiden, wobei dieser nun auch nichtmechanische Phänomene verwendete.

6.2 Von Arago bis Airy

Um 1800 tauchten einige **Fragen zur astronomischen Beobachtungstechnik** auf.[80] Man wollte wissen, wie ein Glasblock, der keine Beugung verursachen soll, in ein Teleskop einzubauen ist. Wird der Glasblock senkrecht zum einfallenden Licht angeordnet - nun entweder mit seiner Oberfläche senkrecht zur Richtung der wahren Position des Sternes ausgerichtet, gerade so als sei keine Aberration vorhanden, oder mit seiner Oberfläche senkrecht zur Richtung der scheinbaren Position, wegen der Abweichung durch die Aberration? Weiter wollte man wissen, ob Lichtstrahlen, die von den Sternen kommen, die gleichen Eigenschaften von Brechung und Reflexion wie Lichtstrahlen zeigen, die von irdischen Quellen ausgehen. Und man wollte wissen, ob die Fokuslänge eines achromatischen Teleskops auf Grund der Änderung der Relativgeschwindigkeit des Lichtes im Teleskop (Äthertheorie) erhöht werden muß, wenn es auf einen Stern gerichtet wird, in dessen Richtung sich die Erde bewegt.

[79] Dies kann man nachlesen in Stewart, S.106
[80] Dies kann man nachlesen in Whittaker, S. 109

Dominique F. Arago suchte die Antwort dieser Fragen im Experiment und stellte fest, daß das Licht, welches von irgendeinem Stern kommt, sich in allen Fällen von Reflexion und Brechung gerade so verhält, als sei der Stern genau an jenem Ort positioniert, an welchem er wegen der Aberration zu sein schien, und die Erde wäre in Ruhe.[81] Dies hatte zur Folge, daß ein mit Wasser gefülltes Teleskop wider Erwarten **keine Vergrößerung der Aberration** zeigt. Um dieses Problem zu verdeutlichen, betrachten wir die Abbildung 16 auf dieser Seite.

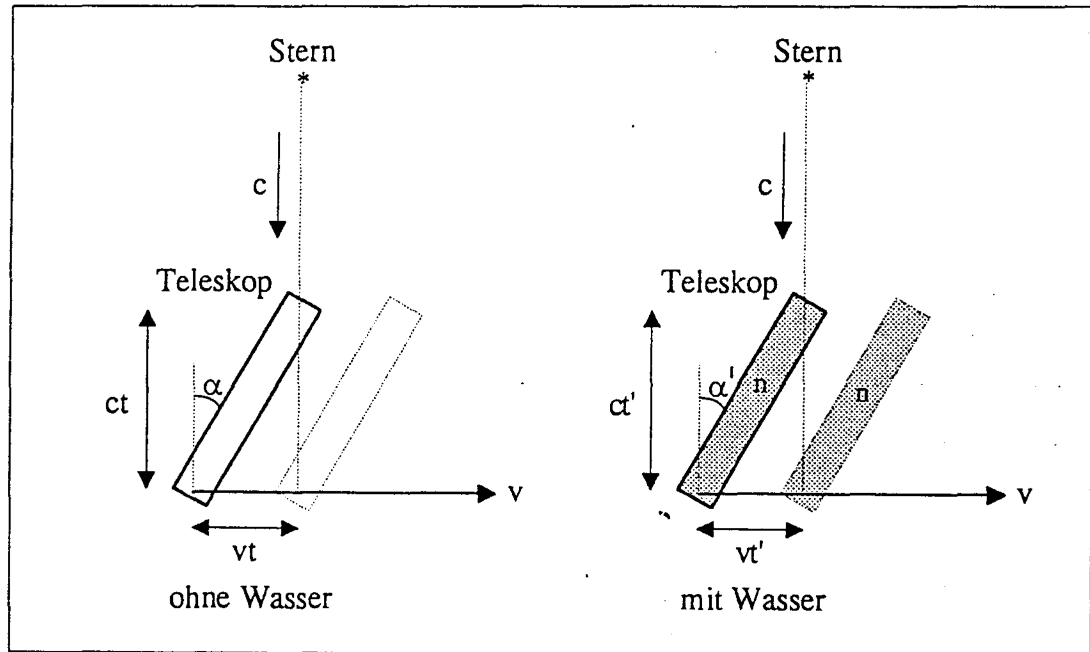


Abbildung 16 Stellare Aberration bei einem Teleskop mit und ohne Wasser[82]

Wir nehmen an, daß sich die Erde durch den Äther bewegt. Damit wird auch das Teleskop durch den Äther hindurch bewegt und der Lichtstrahl, der sich bezüglich des Äthers ausbreitet und von der wahren Position des Sternes kommt, wird relativ zum Teleskop zur Seite abgelenkt. Dies ist die Erklärung für die stellare Aberration, die von Bradley zuerst beobachtet wurde. Da wir nun ein Medium mit größerem Brechungsindex als dem der Luft in das Teleskop eingefügt haben, sollte der Lichtstrahl auf seinem Weg innerhalb des Teleskops etwas länger benötigen, somit $t' > t$ ist, und somit sollte die Aberration erwartungsgemäß zunehmen. Wenn wir den Höhenverlust durch das stärkere Kippen des Teleskops vernachlässigen, so ergibt sich, wenn n den Brechungsindex darstellt

[81] Nachzulesen in Whittaker, S. 109
[82] Variation der Abbildung aus Giancoli, S. 614, Abb. 25-3

$$t' = n \cdot t \text{, mit } n = \frac{c_{Vakuum}}{c_{Medium}}.$$

Deshalb sollte die Aberration um den Faktor n zunehmen! Arago beobachtete jedoch keinerlei Zunahme, so daß er annehmen mußte, die Erde wäre in Ruhe und die Sterne würden wirklich jene "scheinbaren" Positionen einnehmen.[83] Das Ergebnis dieses Experiments entsprach somit einem geozentrischen und nicht einem heliozentrischen Weltbild.

Augustin J. Fresnel stellte aber eine Theorie auf, die Aragos Ergebnis wieder mit dem heliozentrischen Weltbild in Einklang brachte.[84] Er nahm an, daß der Brechungsindex n eines durchsichtigen Objektes von der Ätherkonzentration in diesem abhängt, oder genauer gesagt, daß die Ätherdichte proportional zum Quadrat des Brechungsindex ist. Es ergab sich, wenn c die Lichtgeschwindigkeit in Vakuum und c_1 die Geschwindigkeit in einem relativ zum Äther ruhenden Objekt ist, so daß $n = \frac{c}{c_1}$ den Brechungsindex darstellt, für die Dichte ρ des Äthers im interplanetaren Raum und ρ_1 der Dichte des Äthers im Objekt die Beziehung

$$\rho_1 = n^2 \cdot \rho.$$

Fresnel nahm weiter an, daß ein Teil des Äthers im sich bewegenden Objekt mitgeführt wird, nämlich gerade der zusätzliche Teil des Äthers, welcher gegenüber dem Äther im Vakuum in einem Objekt vorhanden ist, während der restliche Teil des Äthers im Raum, der durch das Objekt erfüllt wird, stationär bleibt. Somit ist die Dichte des Äthers, der mitgeführt oder durch das Objekt mitgezogen wird, gegeben durch

$$\rho_1 - \rho = (n^2 - 1) \cdot \rho,$$

während die Dichte des Äthers, der in Ruhe bleibt, durch ρ gegeben ist. Damit ergibt sich die Schwerpunktsgeschwindigkeit des Äthers zu

$$v_{sp} = \frac{n^2 - 1}{n^2} \cdot v,$$

83 Eine Darstellung der experimentellen Ergebnisse findet man in Whittaker, S. 109
84 Nachzulesen bei Whittaker, S. 109-113 oder Aspden, 1969, S. 196-197

wobei v die Geschwindigkeit des sich bewegenden Objektes ist. Diese Schwerpunktsgeschwindigkeit muß zur Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Lichtwellen im Objekt hinzugefügt werden, weil sich Licht bezüglich des Äthers ausbreitet, also

$$c_1 + v_{sp} = c_1 + \frac{n^2 - 1}{n^2} \cdot v. \qquad (30)$$

George G. Stokes erhielt 1846 auf leicht verändertem Weg auch dieses Ergebnis. Ebenso kann dieses Resultat aus einem Experiment deduziert werden, welches **Hoek** 1868 durchführte.[85]

Die rechte Seite der Gleichung 30 nennt man auch den **Fresnel-Koeffizienten**. Mit dieser Gleichung löste Fresnel das Problem der Brechung in bewegten Objekten. Er zeigte unter Verwendung des Fresnel-Koeffizienten, daß der erwartete Zuwachs an Aberration durch die Mitführung des Äthers ausgeglichen wird, wodurch sich keine Veränderung der Aberration beobachten ließ. "*Somit sehen wir schließlich, daß die Erdbewegung keinen Einfluß in ersten Ordnung auf die Brechung von Sternenlicht hat.*"[86]

Die Gleichung 30 wurde ebenso durch ein Experiment von **Armand H. L. Fizeau** 1859 qualitativ und später durch **Albert A. Michelson** und **E. W. Morley** 1886 quantitativ bestätigt (nicht zu verwechseln mit dem Michelson-Morley-Interferometer-Experiment 1887). Beide experimentellen Apparaturen verwendeten das gleiche Prinzip, wobei Michelson und Morley zusätzlich das **Prinzip der Vielstrahlinterferenz des Interferometers** verwendeten und damit ein **höheres Auflösungvermögen und eine bessere Sichtbarkeit** erzielten. Daher betrachten wir den prinzipiellen Aufbau von Michelson und Morley von 1886.[87]

[85] Das Experiment mit den Berechnungen findet man in Whittaker, S. 110-111

[86] "So finally we see that the motion of the earth has no first-order influence on the refraction of light from the stars." Whittaker, S. 113

[87] Übernommen von A. A. Michelson and E. W. Morley, Influence of Motion of the Medium on the Velocity of Light, in Livingston, S. 111

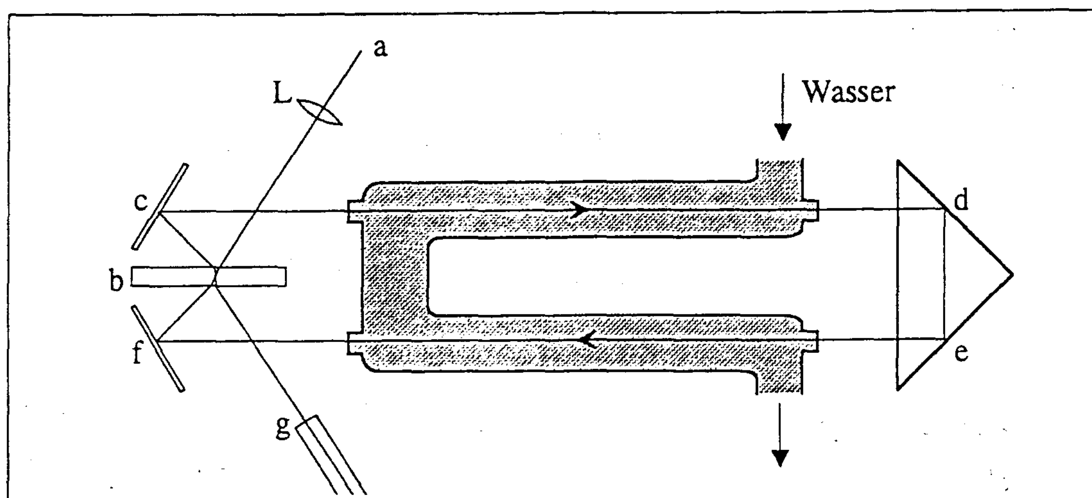


Abbildung 17 Modifikation des Fizeau-Experiments, verwendet von Michelson und Morley im Jahre 1886[88]

In Abbildung 17 ist der prinzipielle Aufbau dargestellt, wobei c, d, e und f ebene Spiegel sind. Licht von der Quelle a wird durch die Linse L parallel gemacht und fällt auf einen halbdurchlässigen Spiegel b, welcher den Lichtstrahl aufteilt. Der eine Teil wird reflektiert und läuft entlang bcdefbg, wobei er sich zweimal gegen den Wasserstrom ausbreiten muß. Der andere Teil wird hindurchgelassen und läuft entlang bfedcbg, wobei er sich zweimal mit dem Wasserstrom ausbreiten kann. Im Beobachtungsfernrohr g kann man dann die **Interferenzstreifen in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit** v des Wassers beobachten. Das Experiment lieferte für die Geschwindigkeit c' des Lichtes im bewegten Medium

$$c' = \frac{c}{n} + \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \cdot v,$$

was in Übereinstimmung mit Gleichung 30 ist.

Das Experiment von **Airy** 1871 bestätigte nochmals die Ergebnisse, die Arago schon 1810 erhalten hatte.[89] Er beobachtete, wie dies Bradley 1725 getan hatte (siehe Kapitel 6.1), den Stern Gamma Draconis; den gleichen Stern, der zur Beobachtung und Erforschung der stellaren Aberration benützt worden war. Auch Airy beobachtete, daß die Aberration durch ein zusätzliches Medium nicht vergrößert wurde (er verwendete Wasser), also ganz in Übereinstimmung mit Aragos experimentellen Ergebnissen und gemäß Fresnels Theorie. Denn Fresnel folgerte aus seiner Formel, wenn

[88] Frei gezeichnet nach Livingston, S. 111, ohne Abb.-Nr.
[89] Airy, S. 35-39

Beobachtungen mit einem wassergefüllten Teleskop durchgeführt würden, die Aberration durch das Vorhandensein des Wassers unverändert bleiben würde - ein Resultat, welches durch Airy 1871 verifiziert worden war.[90]

6.3 Michelson-Morley-Interferometer-Experiment

Nachdem **Albert A. Michelson** (1852-1931) im Jahre 1878 die Lichtgeschwindigkeit erfolgreich gemessen hatte, begann er damit, eine Bestätigung der Hypothese eines Ätherwindes experimentell zu suchen. Sein Gedanke war: Wenn der lichtleitende Äther absolut ruhe und sich die Erde in ihrer Bewegung um die Sonne durch diesen bewege, so müßte man unterschiedliche Laufzeiten bei Lichtstrahlen erwarten, wenn diese sich zum einen in Richtung des Ätherwindes und zum anderen senkrecht dazu ausbreiten. Man kann dies mit einem Schwimmer vergleichen, der zum einen mit und gegen den Strom schwimmt und zum anderen senkrecht dazu hin und her.

Das erste Experiment führte Michelson im Jahre 1881 durch und veröffentlichte es.[91] Leider unterlief ihm bei der Laufzeitbestimmung des Lichtstrahles, der senkrecht zum vermuteten Ätherwind verläuft, ein Rechenfehler, auf welchen er durch **Hendrik A. Lorentz** hingewiesen wurde. Einige Jahre später konstruierte er mit **E. W. Morley** ein verbessertes Interferometer, welches heute als **Michelson-Morley-Interferometer** bekannt ist. Dabei erreichten sie durch Mehrfachspiegelung des Lichtstrahles eine Wegstrecke von etwa 11 Metern, welche beide Lichtstahlen zurückzulegen hatten, bevor diese miteinander interferieren konnten.

Zur Herleitung des Laufzeitunterschiedes, unter der Annahme eines Ätherwindes, sei das Interferometer, wie in Abbildung 18 dargestellt, so ausgerichtet, daß der Zweig MR_1 parallel zur Erdgeschwindigkeit v im Äther liegt.

[90] Nachzulesen in Whittaker, S. 113
[91] Michelson, The relative motion of the Earth and the Luminiferous ether, S. 120-129

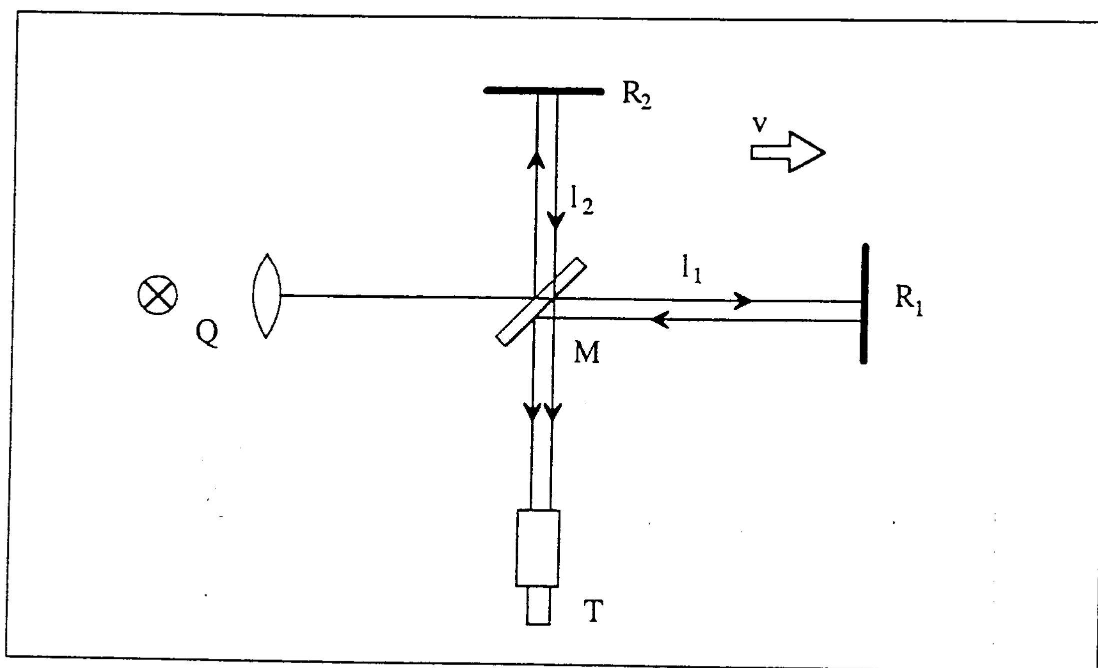


Abbildung 18 Prinzip des Michelson-Morley-Interferometers. Hierbei ist v die Ätherwindgeschwindigkeit[92]

Wandert der Lichtstrahl von M nach R_1, so ist seine relative Geschwindigkeit bezüglich des sich bewegenden Interferometers $c-v$, da dieser sich gegen den Ätherwind bewegt. Somit ergibt sich die Zeit, die er benötigt; um die Strecke MR_1 zu durchwandern, als

$$t_1' = \frac{l_1}{c-v}.$$

Beim Rückweg R_1M wandert der Lichtstrahl mit dem Ätherwind, demnach ist

$$t_1'' = \frac{l_1}{c+v}.$$

Die Gesamtzeit $t_1' + t_1''$ um MR_1M zu durchlaufen, ergibt

$$t_1 = \frac{l_1}{c-v} + \frac{l_1}{c+v},$$

was mit $\gamma = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}}$ umgeschrieben werden kann zu

$$t_1 = \frac{2 \cdot l_1}{c} \cdot \gamma^2.$$

Die Laufzeit der Strecke MR_2M läßt sich mit Hilfe der Abbildung 19 bestimmen.

92 Frei gezeichnet nach Hecht, S. 404, Abb. 9.65

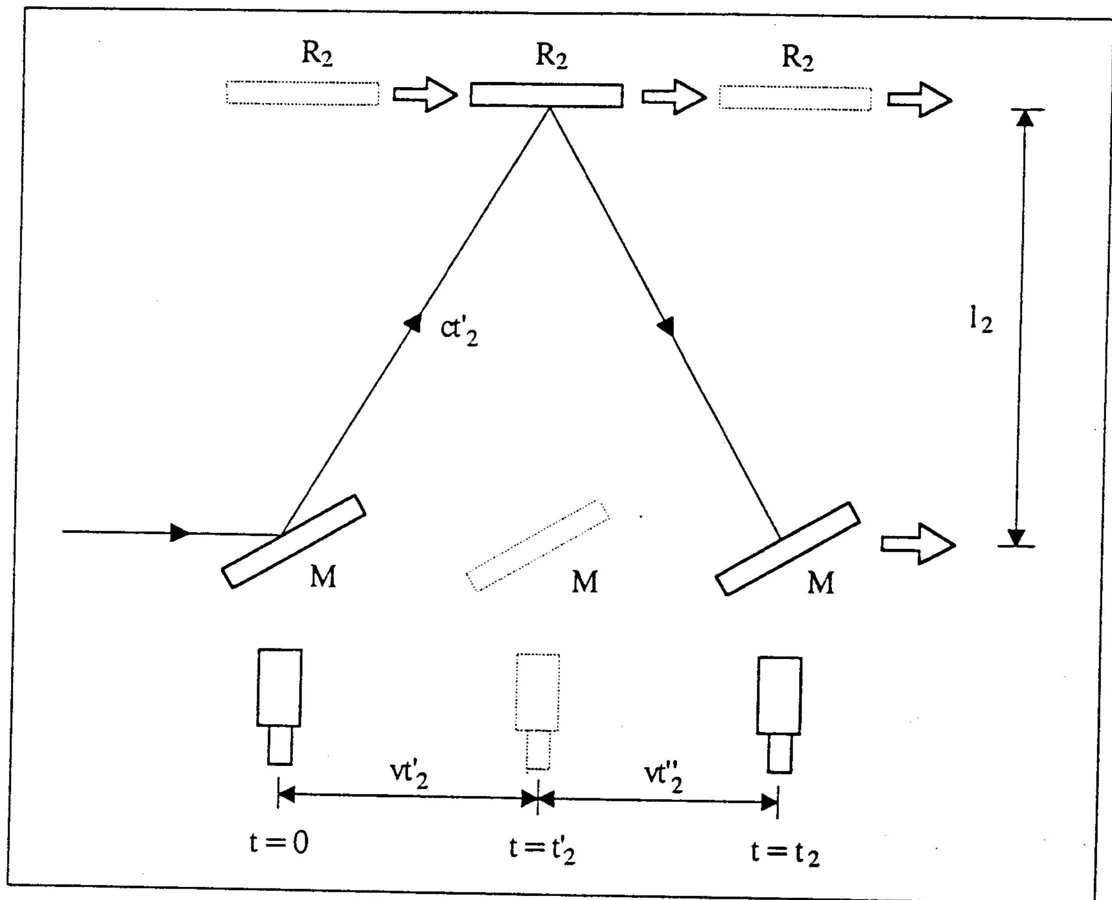


Abbildung 19 Schematische Darstellung zur Berechnung der Laufzeit für den Lichtstrahl, der sich senkrecht zur Ätherwindgeschwindigkeit v ausbreitet[93]

Mit Hilfe des Satzes von Pythagoras erhält man für das erste Dreieck

$$c^2 t_2'^2 = v^2 t_2'^2 + l_2^2,$$

welches umgeformt werden kann zu

$$t_2' = \frac{l_2}{c} \cdot \gamma.$$

Dies ist auch die Zeit, die der Lichtstrahl für den Weg R_2M benötigt, somit ergibt sich die Gesamtzeit $t_2' + t_2''$ zu

$$t_2 = \frac{2 \cdot l_2}{c} \cdot \gamma.$$

Auch wenn beide Interferometerarme gleich lang sind, d.h. $l_1 = l_2 =$, ergibt sich die Laufzeitdifferenz $\Delta t = t_1 - t_2$ zu

$$\Delta t = \frac{2 \cdot l}{c}(\gamma^2 - \gamma).$$

[93] Frei gezeichnet nach Hecht, S. 405, Abb. 9.66

Da die Erdgeschwindigkeit v im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit c sehr klein ist, kann man γ^2 und γ in eine Taylorreihe entwickeln, wobei wir diese nach dem zweiten Glied abbrechen. Wir erhalten schließlich:

$$\Delta t = \frac{l}{c} \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^2 . \tag{31}$$

Die Zeitdifferenz Δt entspricht einem Unterschied in der Anzahl der Wellenlängen, die zwischen MR_1M und MR_2M hineinpassen, welche man aus

$$\Delta N = \frac{\Delta t}{T} = f \cdot \Delta t$$

erhält, wobei T die Periodendauer und f die Frequenz des verwendeten Lichtes ist. Dies entspricht auch der Anzahl der Streifenpaare, bestehend aus einem Maximum und einem Minimum, die sich am Teleskopfadenkreuz vorbeibewegen würden, wenn ein Zeitunterschied Δt während der Beobachtung in die Laufzeiten der Lichtstrahlen durch Modifikation der Apparatur hervorgerufen wird. Dreht man das Interferometer um 90°, so ergibt sich, durch Vertauschen der Indizes in den Gleichungen, ein Laufzeitunterschied von $-\Delta t$. Daher führte man insgesamt bei der Drehung einen Laufzeitunterschied von $2\Delta t$ ein. Nehmen wir eine Geschwindigkeit v an, die gleich der Erdumlaufgeschwindigkeit von etwa 29,8 km/s ist, und sei die Wellenlänge λ des verwendeten sichtbaren Lichtes gleich 550 nm, dann ergibt sich bei einer Drehung um 90°:

$$\Delta N = 2 \cdot f \cdot \Delta t = 2 \cdot \frac{l}{\lambda}\left(\frac{v}{c}\right)^2 \approx 0,4 . \tag{32}$$

Jedoch beobachteten Michelson und Morley **keine Streifenverschiebung** ΔN der Intensitätsmaxima! Dieses Ergebnis nennt man den **Nulleffekt des Michelson-Morley-Interferometer-Experiments**. Sie bestiegen Berge, wiederholten das Experiment zu verschiedenen Jahreszeiten, drehten die Apparatur in verschiedene Richtungen, aber sie fanden keine Streifenverschiebung![94] **Jaffe** schreibt dazu:

"Der sogenannte Ätherwind hatte überhaupt keinen Einfluß auf die Lichtgeschwindigkeit, ob der Strahl sich nun mit dem 'Wind' oder senkrecht dazu bewegte. Es gab nur eine weitere mögliche Folgerung zu ziehen - daß die Erde in Ruhe wäre."[95]

[94] Nachzulesen bei Baker, S. 53-54 oder Giancoli, S. 613

[95] "The so-called ether wind had had no effect whatever on the velocity of light wether the beam

Ebenso stellt **Baker** fest:

"Dies ... legte nahe, daß die Erde 'in Ruhe' bezüglich des Äthers sein mußte. Dies war daher das 'ausgezeichnete' Bezugssystem, um absolute Bewegung im Raum zu messen."[96]

Auch **Giancoli** geht auf diese These ein und bemerkt:

"Eine Möglichkeit war, daß der Äther nicht in Ruhe ist in Bezug auf die Sonne und die anderen Sterne, aber statt dessen in Ruhe in Bezug auf die Erde; in diesem Fall wäre v gleich Null und keine Streifenverschiebung zu erwarten. Aber dies impliziert, daß die Erde irgendwie ein ausgezeichnetes Objekt ist; nur in Bezug auf die Erde wäre die Lichtgeschwindigkeit gleich c, wie durch die Maxwell-Gleichungen vorhergesagt."[97]

Damit kann man auch dieses Experiment als Hinweis für ein geozentrisches Weltbild verstehen. Es käme auch der These entgegen, daß die stellare Aberration nicht durch die Erdbewegung verursacht wird, sondern als Bewegung der Sterne interpretiert werden kann. Somit müßte man gemäß der Keplerschen Beobachtungen die geozentrische Theorie den Ellipsenbahnen anpassen. Man suchte nach einer neuen Erklärung, da man diese geozentrische Theorie als *"alte Idee, albern oder grotesk"*[98] absonderte. Bevor wir diesen Sachverhalt eingehender studieren, betrachten wir noch ein weiteres Experiment.

was traveling with the 'wind' or across it. There was only one other possible conclusion to draw - that the earth was at rest." Jaffe, S. 76

96 "Thus ... suggested that the earth must be 'at rest' in the ether. It was therefore the 'preferred' frame for measuring absolute motion in space." Baker, S. 54

97 "One possibility was that the ether was not at rest with respect to the sun or other stars, but instead is at rest with respect to the earth; in this case *v* would be zero and no fringe shift would be expected. But this implies the earth is somehow a preferred object; only with respect to the earth would the speed of light be *c* as predicted by the Maxwell's equations." Giancoli, S. 613

98 Nachzulesen bei Giancoli, S. 614 und Jaffe, S. 76

6.4 Sagnac-Effekt

Im Jahre 1913 führte **G. Sagnac** Experimente an einem **rotierenden Ringinterferometer** durch. Den prinzipiellen Aufbau kann man aus Abbildung 20 entnehmen.[99]

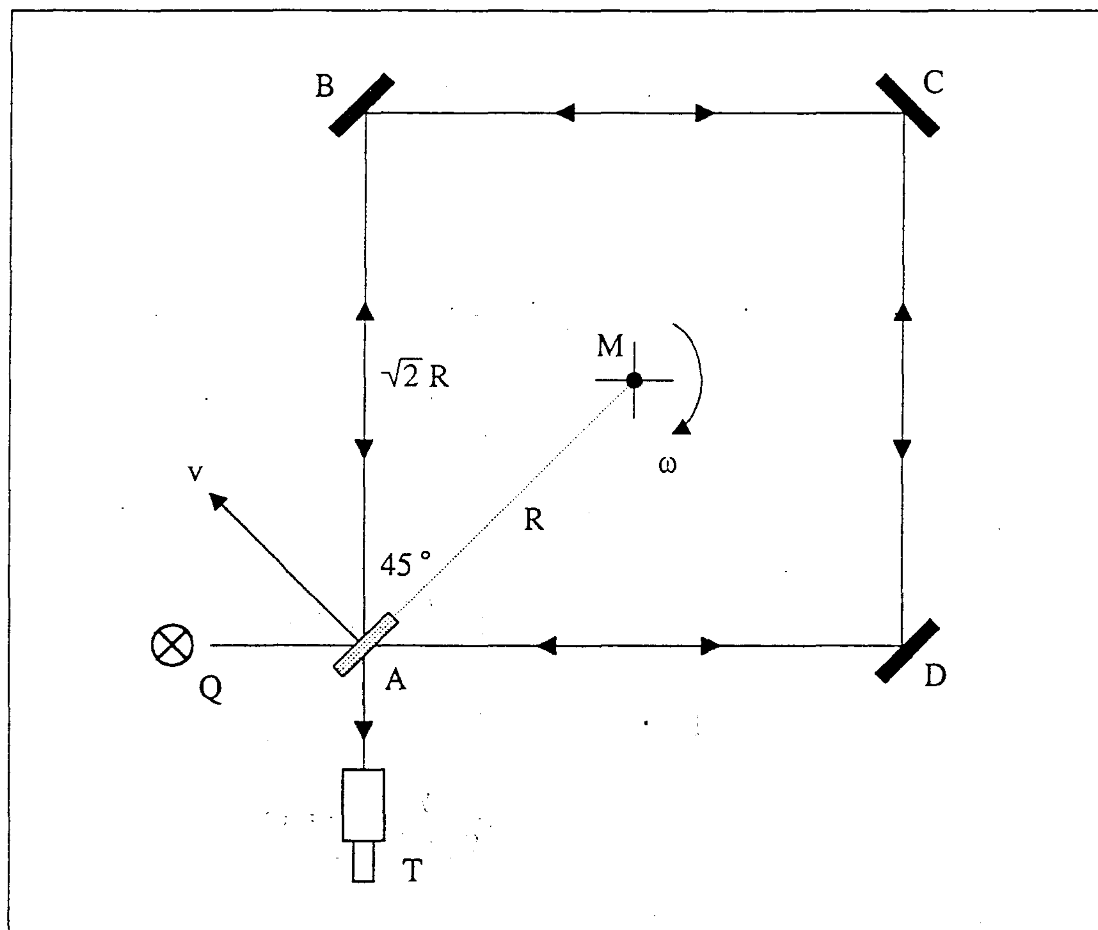


Abbildung 20 Aufbau des Sagnac-Interferometers mit einer rechteckigen Spiegelanordnung[100]

Das Ringinterferometer besteht aus einer Lichtquelle Q, einem Beobachtungsteleskop T, einem halbdurchlässigen Spiegel A (Strahlteiler) und den Spiegeln B, C, D.

Die wesentliche Idee ist hierbei, den Lichtstrahl zu teilen und diese geteilten Lichtstrahlen entlang der Spiegelanordnung zum einen **im Uhrzeigersinn** und zum anderen **im Gegenuhrzeigersinn** durchlaufen zu lassen, um diese nach einem Umlauf schließlich zur Interferenz zu bringen. Das entstehende Interferenzbild kann man dann im Teleskop T beobachten. Bringt man die gesamte Apparatur in Rotation um die Mittelachse, siehe Abbildung 20, so verkürzt die Rotation den Weg der von einem Strahl

[99] Eine entsprechende Abhandlung findet man in Hecht, S. 407-409
[100] Frei gezeichnet nach Hecht, S. 408, Abb. 9.71

genommen wird im Vergleich zum anderen, sofern wir annehmen, daß sich Licht bezüglich des Äthers ausbreitet.

Rotiert die Apparatur mit einer Winkelgeschwindigkeit ω, so bewegt sich die Ecke A mit einer linearen Geschwindigkeit $v = R \cdot \omega$, wobei R die halbe Länge der Diagonalen des Quadrates ist. Als Laufzeit des Lichtes entlang der Strecke AB erhalten wir

$$t_{AB} = \frac{R \cdot \sqrt{2}}{c - \frac{v}{\sqrt{2}}} = \frac{2 \cdot R}{\sqrt{2}\,c - \omega \cdot R}.$$

Die Laufzeit des Lichtes von A nach D ergibt sich entsprechend als

$$t_{AD} = \frac{2 \cdot R}{\sqrt{2}\,c + \omega \cdot R}.$$

Damit erhalten wir für die Laufzeit des im Uhrzeigersinn durchlaufenden Lichtstrahles

$$t_U = \frac{8 \cdot R}{\sqrt{2}\,c - \omega \cdot R}$$

und für den im Gegenuhrzeigersinn durchlaufenden Lichtstrahl

$$t_G = \frac{8 \cdot R}{\sqrt{2}\,c + \omega \cdot R}.$$

Da ωR sehr viel kleiner als c ist, kann man t_U und t_G in eine Taylorreihe entwickeln, wobei man nur die ersten beiden Glieder berücksichtigt, und erhält als Laufzeitdifferenz

$$\Delta t = t_U - t_G = \frac{8R^2\omega}{c^2}.$$

Diesen Ausdruck kann man durch die Fläche $A = 2 \cdot R^2$ des Quadrates, welches durch die Lichtstrahlen eingeschlossen wird, umschreiben zu

$$\Delta t = \frac{4A \cdot \omega}{c^2}. \qquad (33)$$

Wenn wir annehmen, daß wir monochromatisches Licht verwenden (oder eine mittlere Wellenlänge annehmen), so können wir die Teilverschiebung der Interferenzstreifen, die durch $\Delta N = \frac{\Delta t}{T} = \frac{\Delta t \cdot c}{\lambda}$ gegeben ist, berechnen und erhalten

$$\Delta N = \frac{4A \cdot \omega}{\lambda \cdot c} . \qquad (34)$$

Bei einer Wellenlänge λ von 550 nm, einer Fläche A von $1m^2$ und einer Drehzahl von 120 Umdrehungen pro Minute erhalten wir

$$\Delta N \approx 0,3 .$$

Dieses Ergebnis wurde auch experimentell bestätigt. Insbesondere wurde von **A. A. Michelson** und **Henry G. Gale**[101] über diesen Effekt die Winkelgeschwindigkeit der Erde um ihre eigene Achse bestimmt. Dabei berücksichtigten Michelson und Gale in ihrer Rechnung noch den Breitengrad ϕ des Experiments auf der Erde, da die Winkelgeschwindigkeit ω als Vektor betrachtet nicht senkrecht auf der Fläche steht, und erhielten dabei für die Teilverschiebung der Interferenzstreifen

$$\Delta N = \frac{4A \cdot \omega \cdot \sin\phi}{\lambda \cdot c} . \qquad (35)$$

Die verwendeten Parameter ihres Experiments betrugen:

$$\lambda = 570nm, A = 207836,18m^2, \phi = 41^0 46' .$$

Sie beobachteten eine Verschiebung von $\Delta N = 0,230 \pm 0,05$, was mit dem theoretischen Wert von $\Delta N = 0,236 \pm 0,02$ im Rahmen des Meßfehlers übereinstimmte.

Damit unterstützt auch dieses Experiment die Annahme eines lichtleitenden Äthers.

6.5 Zusammenfassung

Unter der Annahme eines lichtleitenden Äthers sind das **Michelson-Morley-Interferometer-Experiment** und die **experimentellen Beobachtungen von Arago und Airy** ohne weitere Annahmen **nicht vereinbar**, wenn man auf dem Standpunkt bleibt, daß sich die Erde durch den Raum um die Sonne bewegt. Andererseits kann man die **meisten Experimente durch** die Annahme eines **Äthers erklären**. Das Ergebnis des Michelson-Morley-Interferometer-Experiments fällt jedoch aus der Reihe. Diese sich widersprechenden experimentellen Ergebnisse werden wir im nächsten Kapitel

101 Nachzulesen unter A. A. Michelson and H. G. Gale, The Effect of the Earth's Rotation on the Velocity of Light, Astrophysical Journal, Vol. 61, S. 140-145

versuchen durch verschiedene Theorien zu erklären, wobei wir sowohl den geozentrischen wie auch den heliozentrischen Standpunkt einnehmen werden.

7 Verschiedenen Theorien

Es wurden verschiedene Theorien entwickelt, welche die im sechsten Kapitel behandelten experimentellen Ergebnisse und damit verknüpft unser Weltbild beschreiben sollen. In diesem Kapitel werden diese Theorien vorgestellt. Dabei werden wir den Schwerpunkt auf einige nennenswerte Theorien legen. Wenn man nach solchen Theorien recherchiert, kann man feststellen, daß auf der Grundlage des Geozentrismus im Vergleich zum Heliozentrismus weitaus weniger Arbeiten gibt. Auf der Grundlage des Heliozentrismus gibt es im Gegensatz dazu eine Fülle von Modellen und Theorien. Von diesen dürfte ohne Zweifel die **Einsteinsche Relativitätstheorie**[102] die bekannteste sein, die wir auch kritisch beleuchten werden. Im Gegensatz zur Theorie von Einstein betrachten wir eine **Theorie von Herbert E. Ives**, die jedoch weniger bekannt sein dürfte, die experimentellen Ergebnisse ebenso beschreiben kann, wobei allerdings an der Vorstellung eines lichtleitenden Äthers festgehalten wird.

7.1 Geozentrismus als Grundlage für Theorien

In Kapitel 5 haben wir gesehen, daß man wegen des Newtonschen Relativitätsprinzips durch mechanische Experimente nicht feststellen kann, welches Bezugssystem absolut ruht. Daher erscheint es durchaus legitim, bei der Beschreibung von mechanischen Vorgängen die Erde als ruhend zu betrachten, beziehungsweise die Erde als Bezugssystem zu wählen. Zur Beschreibung elektromagnetischer Vorgänge, wie die der Lichtausbreitung, nehmen wir an, so wie dies viele Wissenschaftler der vergangenen Jahrhunderte auch taten, daß sich Licht in einem Medium ausbreitet, welches wir **Äther** nennen wollen. Weiter nehmen wir an, daß dieser Äther absolut ruht und den ganzen Raum erfüllt. Für die Lichtausbreitung nehmen wir diesen Äther als Bezugssystem an, wie dies auch **Maxwell** tat, um die nach ihm benannten Gleichungen aufzustellen. Aus diesen Maxwell-Gleichungen ergibt sich die Lichtgeschwindigkeit relativ zum Äther als c (etwa 300.000 km/s), d.h. als Konstante im Bezugssystem Äther.

Diese Vorstellung wollen wir **Geozentrische Äthertheorie** nennen und die Experimente des vorherigen Kapitels in Bezug auf diese Theorie betrachten.

[102] Wir betrachten in dieser Arbeit die Spezielle Relativitätstheorie, die wir im weiteren die Einsteinsche Relativitätstheorie nennen werden.

7.1.1 Geozentrische Äthertheorie und stellare Aberration

Da bei der **Geozentrischen Äthertheorie** die Erde bezüglich des angenommenen Äthers unbewegt ist, können wir die stellare Aberration nicht durch eine Bewegung der Erde erklären. Daher muß man die **beobachtete Bewegung den Sternen zuordnen**. Diese Betrachtungsweise kommt dabei der Vorstellung von Tycho Brahe sehr nahe, nur daß wir die Bahnbewegungen der Planeten um die Sonne als elliptisch annehmen und den Sternen zur Erklärung der stellaren Aberration eine zusätzliche Bewegung zuordnen, wodurch diese nun keine Fixsterne mehr im wörtlichen Sinne sind. Eine solche Betrachtungsweise erscheint künstlich, ist aber durchaus möglich, weil "*wir heute wissen, daß der Unterschied zwischen einer heliozentrischen Theorie und einer geozentrischen Theorie nur einer der relativen Bewegung ist, und daß solch ein Unterschied keine physikalische Bedeutung hat.*"[103]

7.1.2 Geozentrische Äthertheorie und Aragos Experiment

Aus der Sichtweise des Geozentrismus sind die Beobachtungen von Arago eine Bestätigung der Theorie, da man keine Zunahme der stellaren Aberration des Sternenlichtes erwartet, denn man nimmt an, daß die Sterne "tatsächlich" jene beobachtete Bewegung vollführen. Eine Erklärung, wie sie Fresnel vorgeschlagen hatte (siehe Kapitel 6.2), wird dadurch nicht nötig. Das Experiment von Airy bedarf deshalb keiner weiteren Erklärung.

7.1.3 Geozentrische Äthertheorie und Fizeaus Experiment

Das Ergebnis des Fizeauschen Experiments, daß sich die Lichtgeschwindigkeit in relativ zum Äther bewegten Medien erhöht, kann im Rahmen der Äthertheorie erklärt werden, wenn man, wie von Fresnel vorgeschlagen, annimmt, daß der **Äther vom bewegten Medium mitgezogen** wird. Andere Experimente, wie das zitierte Experiment von Hoek, bestätigen diesen Mitführungsbeitrag oder Fresnel-Koeffizienten (siehe Gleichung 30).

---

103 "We now know that the difference between a heliocentric theory and a geocentric theory is one of relative motion only, and that such a difference has no physical significance." Hoyle, S. 416

7.1.4 Geozentrische Äthertheorie und das Michelson-Morley-Interferometer-Experiment

Auch der **Nulleffekt des Michelson-Morley-Interferometer-Experiments bestätigt die Sichtweise der Geozentrischen Äthertheorie**, da man keine Geschwindigkeit des Äthers in Bezug auf die Erde annimmt. Andere Experimente, wie das **Kennedy-Thorndike-Experiment**[104], bei dem ein Interferometerarm in der Länge variiert und ebenso keine Streifenverschiebung beobachtet wurde, lassen sich im Rahmen der Theorie ebenso erklären und bestätigen diese Sichtweise.

7.1.5 Geozentrische Äthertheorie und der Sagnac-Effekt

Der Sagnac-Effekt läßt sich ebenso mit der Äthertheorie erklären, wodurch auch dieser Effekt die Theorie unterstützt. Um das Ergebnis des Michelson-Gale-Experiments zu erklären, müssen wir annehmen, daß die Erde bezüglich des Äthers um ihre eigene Achse rotiert, wodurch die Entstehung von Tag und Nacht erklärt werden kann und durch das **Foucault-Pendel-Experiment** bestätigt wird.[105]

7.1.6 Zusammenfassung der Geozentrischen Äthertheorie

Betrachtet man die Experimente vom Standpunkt der Geozentrischen Äthertheorie, so lassen sich **viele Experimente auf einfache Weise erklären**. Insbesondere führt die Erklärung des Michelson-Morley-Interferometer-Experiment nicht dazu, einen Widerspruch zur Interpretation der Beobachtung der stellaren Aberration herbeizuführen. Es bleibt jedoch die Herausforderung, wie man sich die Bewegung der Sterne, die man als stellare Aberration beobachtet, erklären kann. Diesbezüglich bleibt weiterhin die Vorstellung der Bewegung der Sonne um die Erde zu klären. Eine mögliche Interpretation wäre zum Beispiel, daß sich die **Erde im Schwerpunkt des gesamten**

[104] Kennedy and Thorndike, Experimental Establishment of the Relativity of Time, Physical Review, Vol. 42, 1932, S. 400-418

[105] Eine Darstellung des Foucault-Pendel-Experiments mit einer Erklärung ohne Rechnung findet man in Falk und Ruppel, S. 296-301. Die theoretischen Ergebnisse von H. Thirring, daß die Wirkung ferner rotierender Massen nach der Einsteinschen Gravitationstheorie ein Feld erzeugen, dessen Kräfte der Zentrifugalkraft bzw. Corioliskraft analog sind, lassen wir bei dieser Betrachtung unberücksichtigt. Berechnung dazu findet man unter Hans Thirring, Über die Wirkung rotierender ferner Massen in der Einsteinschen Gravitationstheorie, Physikalische Zeitschrift, Vol. 19, Nr. 3, 1918, S. 33-39

Universums befindet, wobei andere Sterne, nicht sichtbare Massen oder ähnliches die Sonnenbewegung ausgleichen. Für diese These sprechen auch noch andere Beobachtungen und experimentelle Ergebnisse, wie zum Beispiel die Beobachtung von **P. Birch**, daß "*das Universum mit einer Winkelgeschwindigkeit von etwa* 10^{-13}*rad/y rotiert.*"[106] Wenn das Universum rotiert, dann hat es eine ausgezeichnete Achse, die Drehachse. Da die Rotation von der Erde aus zu beobachten ist, liegt es nahe, die Rotationsachse in die Nähe der Erde, wenn nicht sogar in die Erde selbst zu legen.

Damit haben wir einige Vorteile und auch einige ungeklärten Fragestellungen, die sich automatisch ergaben, der Geozentrischen Äthertheorie kennengelernt. Im nächsten Teil werden wir den Standpunkt des Heliozentrismus einnehmen und die Experimente nun aus dieser Sicht betrachten.

7.2 Heliozentrismus als Grundlage für Theorien

Nun gehen wir davon aus, daß die Erde sich um die Sonne bewegt und die Fixsterne näherungsweise als ruhend angenommen werden können.[107] Als nächstes benötigen wir eine Theorie zur Lichtausbreitung, um die durch Experimente gefundenen Eigenschaften des Lichtes verstehen zu können. Im folgenden betrachten wir drei Theorien: die **Heliozentrische Äthertheorie**, **Quellentheorie** und **Einsteinsche Relativitätstheorie**.[108]

7.2.1 Heliozentrische Äthertheorie

Die **Heliozentrische Äthertheorie** haben wir bei der Betrachtung der Experimente und bei den Berechnungen stillschweigend vorausgesetzt, ohne diese beim Namen zu nennen. Denn wir sind davon ausgegangen, daß sich das Licht bezüglich des Äthers ausbreitet und als Folge der Bewegung der Erde durch den Äther verschiedene relative Lichtgeschwindigkeiten in Bezug auf die Erde möglich sein können. Die Bewegung der Erde um die Sonne haben wir benötigt, um durch die Relativbewegung der Erde zum Äther die stellare Aberration zu erklären. Zur Erklärung der Versuche von Arago

[106] Nachzulesen in P. Birch, Is the Universe rotating?, Nature, Vol. 298, 29 July 1982, S. 451-454
[107] Die Einschränkung "näherungsweise ruhend" kommt der Beobachtung von P. Birch entgegen.
[108] Wobei wir weiterhin darunter die Spezielle Relativitätstheorie verstehen wollen, die von Einstein 1905 veröffentlicht wurde.

und Airy verwendete man die Annahme von Fresnel, daß der Äther durch bewegte Medien mitgezogen wird. Dieser Mitführungseffekt, oder Fresnel-Koeffizient, wurde später durch das Experiment von Fizeau qualitativ und danach durch Michelson und Morley 1886 quantitativ bestätigt. Bis zu diesem Zeitpunkt war die Äthertheorie in Übereinstimmung mit den Experimenten. Doch sorgte das **Michelson-Morley-Interferometer-Experiment** für eine **unvorhergesehene Überraschung**, ähnlich wie dies durch das Experiment von Arago geschehen war, da es den von der Heliozentrischen Äthertheorie vorhergesagten Effekt nicht lieferte. Im Gegensatz dazu ist der Sagnac-Effekt im Rahmen dieser Theorie erklärbar. Es bleibt nun noch die Herausforderung den Nulleffekt des Michelson-Morley-Interferometer-Experiment zu erläutern. Da man vorher mit der Annahme eines Äthers alle bis dahin gemachten Beobachtungen deuten konnte, so zum Beispiel Reflexion, Beugung, Brechung und Polarisation[109], versuchte man zunächst eine Lösung des Problems unter Beibehaltung der Äthertheorie zu finden. Erst nach den experimentellen Erfolgen der Einsteinschen Relativitätstheorie gaben die meisten Wissenschaftler auf, die Äthertheorie beizubehalten.

Das eben erwähnte Problem wird besonders deutlich, wenn man das Ergebnis der Beobachtung der stellaren Aberration und das des Michelson-Morley-Interferometer Experiments direkt vergleicht. Zur richtigen Deutung des Michelson-Morley-Interferometer-Experiments muß ein relativ zur Erde ruhender Äther angenommen werden, hingegen benötigt die stellare Aberration einen relativ zur Erde bewegten Äther.

Das **Problem des Nulleffektes lösten G. F. Fitzgerald** und **H. A. Lorentz** um 1892 unabhängig voneinander, indem sie annahmen, daß jede Länge in Richtung der Bewegung durch den Äther durch einen Faktor $\gamma^{-1} = \sqrt{1 - v^2/c^2}$ verkürzt wird, man nennt dies auch die **Längenkontraktion** oder **Fitzgerald-Larmor-Lorentz-Kontraktion**. In Bezug auf diese Kontraktion schreibt Lorentz:

> *"So befremdend die Hypothese auch auf den ersten Blick erscheinen mag, man wird dennoch zugeben müssen, daß sie gar nicht so fern liegt, sobald man annimmt, daß auch Molekularkräfte, ähnlich wie wir es gegenwärtig von den elektrischen und magnetischen Kräften bestimmt behaupten können, durch den Äther vermittelt werden. Ist dem so, so wird die Translation die Wirkung zwischen zwei Molekülen oder Atomen höchstwahrscheinlich in ähnlicher Weise ändern, wie die Anziehung oder Abstoßung zwischen geladenen Teilchen. Da nun die Gestalt und die Dimensionen eines festen Körpers in letzter Instanz durch die Intensität der*

[109] Darauf wird hingewiesen in Otis, S. 6

Molekularwirkungen bedingt werden, so kann dann auch eine Änderung der Dimension nicht ausbleiben."[110]

Die Kontraktion der Längen in Bewegungsrichtung bedeutet in Bezug auf den Michelson-Morley-Interferometer Versuch, daß bei der Berechnung der Laufzeit statt l_1 nun $\frac{l_1}{\gamma}$ eingesetzt werden muß, daher erhalten wir anstelle von

$$t_1 = \frac{2 \cdot l_1}{c} \cdot \gamma^2 \quad \text{nun} \quad t_1 = \frac{2 \cdot l_1}{c} \cdot \gamma .$$

Damit ergibt sich nun auch keine Streifenverschiebung der Intensitätsmaxima mehr, womit der **Nulleffekt des Michelson-Morley-Interferometer-Experiments erklärt** wäre. Auch für das **Kennedy-Thorndike-Experiment**[111] mit unterschiedlichen Längen der Interferometerarme kommt man mit Hilfe der **Fitzgerald-Larmor-Lorentz-Kontraktion** auf einen Nulleffekt, so wie dies auch von Kennedy und Thorndike beobachtet wurde. Für den Sagnac-Effekt spielt die Längenkontraktion keine wesentliche Rolle, da die Kontraktion für beide Wegstrecken gleich groß ist und sich nur in der totalen Laufzeit bemerkbar macht. Vom Ergebnis bleibt der Sagnac-Effekt im Rahmen der Meßgenauigkeit unberührt, da die Längenänderung durch die Kontraktion nur einen Effekt der zweiten Ordnung beinhaltet.[112]

Fitzgerald, Lorentz und auch Larmor gehen zusätzlich davon aus, daß die Bewegung einer Uhr relativ zum Äther zu einer **Zeitdilatation** der Uhr führt (d. h. bewegte Uhren gehen langsamer); Lorentz prägte in diesem Zusammenhang den Begriff der **Ortszeit**. Damit ergibt sich nun eine Heliozentrische Äthertheorie, die mit Längenkontraktion und Uhrzeitdilatation alle experimentellen Beobachtungen erklären kann. Hierbei bleiben der physikalische Raum und die Zeit als unabhängige und absolute Größen erhalten, da die Uhrzeitdilatation nur für die Meßapparatur Uhr gilt. Die Zeit kann deshalb weiter als absolut angesehen werden, jedoch ist diese absolute Zeit nicht durch eine Messung zu bestimmen. Diese Ansichten vertritt auch Herbert E. Ives, der die Heliozentrische Äthertheorie zu einer noch heute aktuellen Theorie ausgebaut hat[113], wobei er wie Michelson, Fitzgerald, Lorentz und Larmor nicht an der

---

[110] Lorentz, Einstein, Minkowski, S. 3

[111] Kennedy and Thorndike, Physical Review, Vol. 42, 1 November 1932, S. 400-418

[112] Dies kann man nachlesen bei Ives, Genesis of the Query "Is There an Ether?" in Turner and Hazelett, S. 190

[113] Das Buch von Turner and Hazelett kann als Einführung in die Theorie von Ives herangezogen werden, sofern weiteres Interesse besteht. Einige Aspekte, die man auch in diesem Buch finden kann, werden wir später noch eingehender betrachten.

Existenz eines lichtleitenden Äthers gezweifelt hat.[114]

7.2.2 Quellentheorie

Wir bleiben bei dem **heliozentrischen Weltbild**, geben nun aber den Standpunkt auf, daß sich Licht im Äther ausbreitet. Statt dessen nehmen wir an, daß sich das Licht mit konstanter Geschwindigkeit c relativ zur Lichtquelle ausbreitet, wobei vorausgesetzt wird, daß sich die Lichtquelle dabei geradlinig und gleichförmig bewegt, d.h. bezüglich eines geeignet gewählten Inertialsystems ruht. In diesem Fall wird die Lichtquelle stets im Zentrum der Wellenfronten bleiben. Falls die Lichtquelle jedoch einen gekrümmten Weg verfolgt oder sonst irgendwie beschleunigt wird, so wird sich die Lichtquelle vom Zentrum der Wellenfronten des Lichtes entfernen und somit wird die Geschwindigkeit der Lichtstrahlen in die verschiedenen Richtungen relativ zur Quelle nicht konstant sein können.[115] Dies bedeutet, daß sich die Lichtstrahlen nur in dem Inertialsystem mit der Geschwindigkeit c ausbreiten, in dem die Quelle ruht.

Mit dieser **Quellentheorie** läßt sich nun die Beobachtung der stellaren Aberration erklären. Die experimentellen Ergebnisse von Arago und Airy benötigen nun eine neue Erklärung, da Fresnel in seinem Erklärungsmodell von einem lichtleitenden Äther ausgegangen war. Das **Michelson-Morley-Interferometer-Experiment** ist dagegen **mit der Quellentheorie erklärbar, ebenso** das **Kennedy-Thorndike-Experiment. Auch der Sagnac-Effekt** läßt sich mit dieser Theorie **erklären**, wobei man die Lichtausbreitung in einem rotierenden und daher beschleunigten Bezugssystem beschreiben muß. Somit bleibt bei dieser Theorie nur noch die Herausforderung die experimentellen Ergebnisse von Arago und Airy zu erklären. Dies dürfte jedoch nicht so einfach sein, da man Längenkontraktion, Zeitdilatation oder den Fresnel-Koeffizienten im Rahmen der Theorie ausschließt. Sonst wäre die Einführung der Quellentheorie nichts grundlegend Neues im Vergleich zur geo- und Heliozentrischen Äthertheorie oder der Einsteinschen Relativitätstheorie.

[114] Dies erkennt man bei Betrachtung des Textes von Ives, Genesis of the Query "Is There an Ether" in Turner and Hazelett, S. 188

[115] Darauf weist Otis in einer Anmerkung auf Seite 6 seines Buches hin.

7.2.3 Einsteinsche Relativitätstheorie

Wir bleiben weiterhin beim heliozentrischen Weltbild. Die **Einsteinsche Relativitätstheorie**[116] macht folgendes Postulat:[117]

> Die **physikalischen Gesetze** inklusive der Maxwell-Gleichungen **gelten in allen Intertialsystemen**.

Dies bedeutet zum Beispiel, daß jedes physikalische Experiment auf dem Boden (ruhendes Inertialsystem) wie in einem fahrenden Zug (bewegtes Inertialsystem) die gleichen Resultate liefert. Die **Betrachtungsweise** nach der Einsteinschen Theorie **kann auch umgekehrt werden**, d.h. der Boden kann als bewegt und der Zug als ruhend angenommen werden. Aus diesem Postulat folgerte Einstein die **Konstanz der Lichtgeschwindigkeit** für alle Inertialsysteme[118] und die **Lorentztransformation für Raum und Zeit**.[119] Die Maxwell-Gleichungen erweisen sich dabei gegenüber der Lorentztransformation als forminvariant.[120] Daraus schließt Einstein nun, daß man keinen Äther mehr als Bezugssystem benötigt, bezüglich dem die Maxwell-Gleichungen ausschließlich Gültigkeit haben. Dafür gibt er die Unabhängigkeit und die Absolutheit von Zeit und Raum auf. **Hermann Minkowski** formulierte dies folgendermaßen: "*Von nun an sollen Raum für sich und Zeit für sich völlig zu Schatten herabsinken und nur noch eine Art Union der beiden soll Selbständigkeit bewahren.*"[121]

Mit Hilfe des Postulats und den Lorentztransformationen lassen sich die **stellare Aberration**, das **Fizeau-Experiment**[122] und damit auch die **experimentelle Beobachtung von Arago und Airy**, sowie das **Michelson-Morley-Interferometer-Experiment** und der **Sagnac-Effekt**[123] **erklären**.

---

116 Darunter verstehen wir die Spezielle Relativitätstheorie Einsteins von 1905.
117 Dies kann man nachlesen bei Fliessbach, S. 23
118 Nachzulesen bei Breuer, dtv-Atlas zur Physik, Band 2, S. 345, dies ergibt sich auch aus der Darstellung von Einstein über die spezielle Relativitätstheorie in Einstein, S. 1-39
119 Nachzulesen bei Fliessbach, S. 26, die Lorentztransformation mit Einschränkung auf Bewegungen in einer Richtung findet man unter (LT 1) und (LT 2) im Kapitel 8.4.2
120 Dies kann man nachlesen bei Fliessbach, S. 38 ff
121 Lorentz, Einstein, Minkowski, S. 56
122 Das Ergebnis des Fizeauschen Experiments sieht Einstein als Bestätigung der Relativitätstheorie, da sich aus dem Additionstheorem für Geschwindigkeiten das Fizeausche Ergebnis herleiten läßt. Diesen Hinweis findet man bei Einstein, S. 28 (in der Fußnote)
123 Eine relativistische Behandlung des Sagnac-Effektes findet man bei Ives, Light Signals Sent Around a Closed Path, S. 296-299

7.3 Zusammenfassung

Wir haben vier Theorien in Bezug auf die Lichtausbreitung kennengelernt, die Geozentrische und Heliozentrische Äthertheorie, die Quellentheorie und Einsteinsche Relativitätstheorie. Dabei haben wir festgestellt, daß man mit der Geozentrischen Äthertheorie alle experimentellen Ergebnisse deuten kann, wenn man die Beobachtung der stellaren Aberration einer Bewegung der Sterne zuschreibt. Die Quellentheorie hingegen kann das Resultat der Versuche von Arago und Airy nicht erklären. Die Heliozentrische Äthertheorie ist unter Annahme der FLL-Kontraktion ebenso wie die Einsteinsche Relativitätstheorie in der Lage, alle aufgeführten experimentellen Ergebnisse zu interpretieren. Im nun folgenden Kapitel betrachten wir Folgerungen und Eigenschaften der eben behandelten Theorien.

8 Folgerungen aus den betrachteten Theorien

In diesem Kapitel werden wir die Heliozentrische Äthertheorie und die Einsteinsche Relativitätstheorie einer **kritischen Betrachtung** unterziehen, da mit diesen Theorien wesentliche Neuerungen - eine Veränderung der Betrachtungsweise von Zeit und Raum in Abhängigkeit der Relativgeschwindigkeit von Bezugssystemen - eingeführt wurde. Deshalb können von diesen beiden Theorien neue Folgerungen und Konsequenzen erwartet werden.

Der Vollständigkeit halber werden wir die Geozentrische Äthertheorie und Quellentheorie betrachten, obwohl keine wesentlich neuen Folgerungen erwartet werden.

Dieses Kapitel behandelt die Folgerungen aus den betrachteten Theorien in systematischer Reihenfolge, um einen besseren Einblick in die Unterschiede der einzelnen Theorien zu gewährleisten.

8.1 Folgerungen aus der Geozentrischen Äthertheorie

Aus der Sicht der Geozentrischen Äthertheorie sind der physikalische Raum und die Zeit absolute Größen und voneinander unabhängig. Die Gegenwart, das "Jetzt" und "Hier" für einen Beobachter, existiert jetzt, überall und im gleichen Augenblick. Als Bezugssystem für die absolute Bewegung gilt der Äther, der im gesamten Universum als ruhend angenommen wird. Bewegt sich ein Beobachter relativ zum Äther, so sind für diesen Beobachter relative Lichtgeschwindigkeiten möglich, die größer oder kleiner als c sind. Eine Frequenzverschiebung im Spektrum einer Lichtquelle wird ein Beobachter als Veränderung der Lichtgeschwindigkeit interpretieren.

Die **Unterscheidung von elektrischen und magnetischen Erscheinungen** bei einer Probeladung wird von der **relativen Geschwindigkeit** der Probeladung zum **ruhenden Äther** abhängig gemacht. Diese Unterscheidung wird möglich, da man eine zum Äther bewegte Probeladung als elektrischen Strom auffassen kann, welches ein magnetisches Feld erzeugt. Eine zum Äther ruhende Probeladung erzeugt allerdings nur ein elektrisches Feld. Ein Experimentator könnte damit eine Aussage über seinen relativen Bewegungszustand gegenüber dem Äther treffen. Da der Äther als absolut

ruhend angenommen wird, kann dieser damit auch seinen absoluten Bewegungszustand bestimmen.

Im Rahmen des geozentrischen Weltbildes kann unser Sonnensystem jedoch nicht isoliert betrachtet werden, man muß stets die Bewegung weiterer Sterne, Galaxien oder unsichtbare Massen - im Sinne eines Ausgleiches für die Schwerpunktsannahme der Erde im Universum - in Betracht ziehen.

8.2 Folgerungen aus der Quellentheorie

Auch bei dieser Theorie sind Raum und Zeit absolut und voneinander unabhängig. Im Inertialsystem, in dem die Lichtquelle ruht, wird man c als die Lichtgeschwindigkeit messen können. In anderen Bezugssystemen, die gegenüber dem Lichtquellensystem in relativer, eventuell auch relativ dazu beschleunigter Bewegung sind, kann man eine veränderte Lichtgeschwindigkeit messen. Eine Frequenzverschiebung im Spektrum einer Lichtquelle wird ein Beobachter als Relativbewegung in Bezug auf die Lichtquelle interpretieren.

Wegen der experimentellen Ergebnisse von Arago und Airy könnte ein Vertreter der Quellentheorie schließen, daß die Erde ruht, dann müßte er aber wie ein Vertreter der Geozentrischen Äthertheorie die stellare Aberration damit erklären, daß die Sterne die beobachtete Bewegung vollführen.

Letztlich kann ein Vertreter der Quellentheorie nur Aussagen über relative Bewegungen machen. Dies entspricht auch dem Newtonschen Relativitätsprinzip, welches nun auch elektromagnetische Erscheinungen, d.h. nichtmechanische, einschließt. Daher werden wir dieses **erweiterte Prinzip** nun das **Relativitätsprinzip** nennen. Das Relativitätsprinzip drückt aus, daß in **jedem Inertialsystem** die Gesetze **physikalischer Phänomene dieselben** sind und daß man daher den absoluten Bewegungszustand nicht bestimmen kann.[124]

Damit kann ein Vertreter der Quellentheorie, wegen des Relativitätsprinzips, keine absolute Aussage über den Bewegungszustand der Erde machen und somit auch keine

[124] Bernstein zitiert dieses Prinzip, welches Poincaré im Jahre 1904 bei einem Kongreß vorgetragen hat. Dies findet man in Bernstein, S. 78-79.

Entscheidung zwischen Geozentrismus und Heliozentrismus herbeiführen, wenn sich diese Entscheidung auf physikalische Experimente gründen soll.

8.3 Folgerungen aus der Heliozentrischen Äthertheorie

Da die Heliozentrische Äthertheorie von **Herbert E. Ives** (1882-1953) vertreten und erweitert wurde, betrachten wir einige seiner Beiträge zur Heliozentrischen Äthertheorie[125], um daraus Folgerungen und Konsequenzen der Heliozentrischen Äthertheorie zu erhalten.

8.3.1 Geschwindigkeit, Maßstäbe und Uhren

Zunächst müssen wir definieren, was wir unter **"Geschwindigkeit"** verstehen wollen, da die Meßinstrumente, entsprechend der Heliozentrischen Äthertheorie, durch die Bewegung relativ zum Äther einer Veränderung unterliegen.[126] Ives definiert die Geschwindigkeit folgendermaßen:

$$Geschwindigkeit = \frac{zurückgelegte\ Entfernung\ im\ Äther}{Zeit,\ um\ Entfernung\ zurückzulegen}\ .$$

Hierbei wird die Entfernung durch materielle Maßstäbe gemessen, die bezüglich des Äthers ruhen, und die Zeit durch eine im Äther stationäre Uhr. Dies entspricht der Definition der Geschwindigkeit, die man vor der Einführung der **Fitzgerald-Larmor-Lorentz-Kontraktion**[127] verwendete. Die FLL-Kontraktion wird damit als eine Funktion der Geschwindigkeit (im oben definierten Sinne) relativ zum Äther verstanden. Somit gilt für einen Meßstab, der eine Ruhelänge von l_0 hat und mit einer Geschwindigkeit v (wie oben definiert) in Bewegung ist,

$$l = l_0 \cdot \left[1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} = \frac{l_0}{\gamma} \qquad (36)$$

[125] Die Beiträge lauten: The Measurement of the Velocity of Light by Signals Sent in One Direction, The FitzGerald Contraction, Lorentz-Type Transformations as Derived from Performable Rod and Clock Operations, alle in Turner and Hazelett, S. 136-141, S. 163-181, S. 142-146

[126] Ives schlägt dies vor, um zwischen tatsächlicher Geschwindigkeit relativ zum Äther und einer gemessenen Geschwindigkeit unterscheiden zu können. Dies findet man in Ives, The Measurement of the Velocity of Light by Signals Sent in One Direction, S. 880.

[127] Dies kürzen wir im weiteren mit FLL-Kontraktion ab.

und eine Uhr mit einer Ruhefrequenz f_0 nimmt bei einer Geschwindigkeit v die Frequenz

$$f = f_0 \cdot \left[1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} = \frac{f_0}{\gamma} \tag{37}$$

an. Wegen der Frequenzveränderung der Uhr, die durch die Bewegung relativ zum Äther hervorgerufen wird, müssen wir nun zwischen **zwei Methoden zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit** unterscheiden, die Messung der Lichtgeschwindigkeit mit einer Uhr und mit zwei Uhren.

8.3.2 Messung der Lichtgeschwindigkeit mit einer Uhr

Wenn man bei der Messung der Lichtgeschwindigkeit nur eine Uhr verwenden will, so muß man den Lichtstrahl wieder zum Ausgangspunkt der Messung zurückbringen. Dies läßt sich durch eine einfache Spiegelanordnung realisieren.

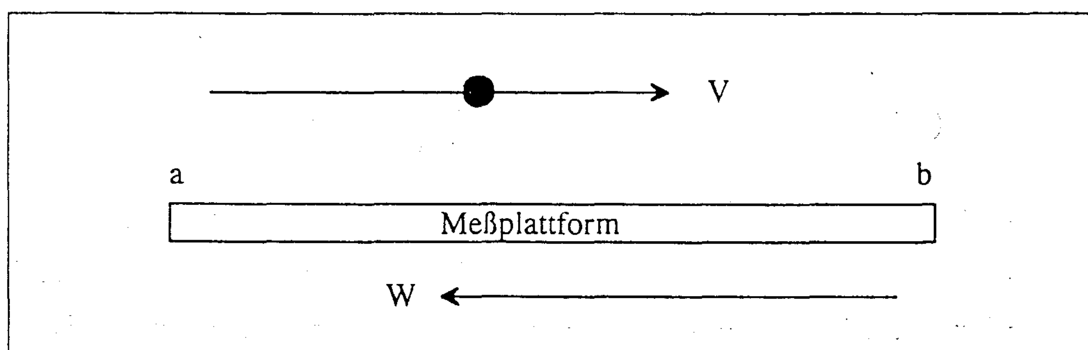


Abbildung 21 Meßplattform mit einer Geschwindigkeit W relativ zum Äther und den Meßpunkten a und b, ein Objekt mit einer Geschwindigkeit V relativ zum Äther fliegt daran vorbei[128]

In Abbildung 21 sieht man eine Meßplattform zwischen den Punkten a und b. Bei a sei eine Uhr und bei b sei ein Spiegel fest mit der Meßplattform verbunden. W sei die Geschwindigkeit des Äthers bezüglich der Meßplattform. Es sei weiterhin D' diejenige Länge der Plattform, die man durch Anlegen eines Meßstabes erhält. Somit ist die tatsächliche Länge wegen der FLL-Kontraktion durch $D'\sqrt{1-(W/c)^2}$ gegeben. Für die Zeit t_1, die ein Lichtstrahl von a nach b benötigt (gemessen durch eine stationäre Uhr im Äther), erhalten wir

[128] Frei gezeichnet nach Ives, "The Measurement ...", S. 881, Abb. 1, schematisch

$$t_1 = \frac{D' \sqrt{1-(W/c)^2}}{c-W}$$

und analog für den umgekehrten Weg von b nach a

$$t_2 = \frac{D' \sqrt{1-(W/c)^2}}{c+W} ,$$

womit sich als Gesamtzeit

$$t_1 + t_2 = \frac{2c \cdot D' \sqrt{1-(W/c)^2}}{c^2 - W^2}$$

ergibt. Wenn nun t' diejenige Zeit ist, die wir als Gesamtzeit durch die Uhr bei a messen, so erhalten wir durch die FLL-Kontraktion

$$t_1 + t_2 = \frac{t'}{\sqrt{1-(W/c)^2}}$$

woraus sich schließlich

$$c = 2 \cdot \left(\frac{D'}{t'}\right) \qquad (38)$$

ergibt. Damit haben wir die Lichtgeschwindigkeit (im oben definierten Sinn) als Quotient zwischen Längenmessung D' und Zeitmessung t' erhalten, obwohl die Lichtgeschwindigkeit relativ zur Plattform c - W für den Hin- und c + W für den Rückweg beträgt. Die FLL-Kontraktion hat die Plattformgeschwindigkeit W zum Verschwinden gebracht, wodurch wir allerdings durch eine solche Messung keine Möglichkeit haben, die Geschwindigkeit W der Plattform zu bestimmen. Damit **erklärt sich** auch der **Nulleffekt des Michelson-Morley-Interferometer-Experiments**.

Um zwischen Geschwindigkeit bezüglich des Äthers (im definierten Sinne) und gemessener Geschwindigkeit aus Entfernung und Zeit zu unterscheiden, schlägt Ives vor, die Geschwindigkeit im Bezug auf den Äthers weiterhin als "Geschwindigkeit" zu bezeichnen, so wie dies oben definiert wurde, und für die Geschwindigkeitsmessungen mit Apparaturen, die der FLL-Kontraktion unterliegen, den Begriff **"Meßstab-Uhr-Quotient"** (im Englischen: rod-clock-quotient) einzuführen und dafür den Buchstaben Q zu verwenden, wobei geeignete Indizierungen für die verschiedenen

Meßmethoden stehen sollen. So steht Q_1 für eine Messung mit einer Uhr auf der Meßplattform, wie oben verwendet, und Q_2 wird verwendet, um anzuzeigen, daß zwei Uhren, die stationär auf der Meßplattform installiert sind, zur Laufzeitbestimmung benutzt werden.

Mit dieser Notation können wir das Ergebnis der obigen Messung mit einer fest installierten Uhr schreiben als

$$Q_1 = c \,. \tag{39}$$

Als nächstes betrachten wir die Methode der Lichtgeschwindigkeitsmessung mit zwei Uhren entlang einer Strecke.

8.3.3 Messung der Lichtgeschwindigkeit mit zwei Uhren

Um die Laufzeit eines Lichtsignals entlang eines Weges bestimmen zu können, ist es notwendig, die Startzeit an einem Punkt a und die Zielzeit an einem anderen Punkt b zu messen (siehe Abbildung 21). Dies bedeutet, daß wir nicht mehr nur mit einer Uhr auskommen, wir benötigen **zwei identische Uhren**. Die **Frequenzsynchronisation** erreichen wir dadurch, daß wir die Uhren fest auf einer Plattform installieren. Zur **Zeitsynchronisation** können wir keinen Lichtstrahl oder etwas ähnliches benutzen, da wir die Geschwindigkeit der Plattform bezüglich des Äthers nicht kennen. Dadurch bleibt nur die Möglichkeit, die zweite Uhr zum Startort a zu nehmen, die beiden Uhren in Übereinstimmung zu bringen und danach die zweite Uhr zum Zielort b zu transportieren - oder, was äquivalent dazu ist, eine dritte Uhr zur Übertragung der Zeitsynchronisation zu benutzen. Dabei wird die Frequenz der bewegten Uhr eine Veränderung erfahren, wodurch wir eine Verschiebung der Synchronisationszeit erhalten. Diese Veränderung werden wir mittels der geometrischen Abmessung des Aufbaus und der FLL-Kontraktion berechnen.

Dazu betrachten wir zunächst die Uhr, die gleichmäßig von a nach b gebracht wird. Diese gleichmäßige Bewegung muß mit der Uhr selbst gemessen werden, indem man die Teilstrecke, über die man sich bewegt, durch das verstrichene Zeitintervall dividiert, welches mit der bewegten Uhr selbst gemessen werden muß - es gibt hierbei keine andere Möglichkeit, eine Geschwindigkeitsmessung vorzunehmen.[129]

Bezeichnen wir mit Y die Geschwindigkeit (im Sinne der obigen Definition) der Uhr, dann erhalten wir, wegen der FLL-Kontraktion,

$$Y = \frac{D}{\tau} = \frac{D'}{\tau'}\sqrt{1 - \frac{W^2}{c^2}}\,\sqrt{1 - \frac{(W+Y)^2}{c^2}}\ . \tag{40}$$

Hierbei ist D' der Abstand zwischen a und b, der durch einen auf der Plattform ruhenden Längenmeßstab gemessen wird, der Abstand D ist durch den Faktor $\sqrt{1 - W^2/c^2}$ verkürzt, wobei W die Geschwindigkeit des Äthers bezüglich der Plattform ist, τ' ist das Zeitintervall, welches die bewegte Uhr anzeigt, dieses ist geringer durch den Faktor $\sqrt{1-(W+Y)^2/c^2}$ gegenüber dem Zeitintervall einer im Äther stationären Uhr.

Gemäß dieser Festlegung ist nun D'/τ' der Meßstab-Uhr-Quotient q für die bewegte Uhr. Wenn wir diesen in Gleichung 40 einsetzen und nach Y auflösen erhalten wir

$$Y = \frac{q\cdot\left(1 - \frac{W^2}{c^2}\right)}{\sqrt{1 + \frac{q^2}{c^2}} + \frac{qW}{c^2}}\ . \tag{41}$$

und ebenso

$$\tau' = \frac{\tau\cdot\sqrt{1 - \frac{W^2}{c^2}} - \frac{W\cdot D}{c^2\cdot\sqrt{1 - \frac{W^2}{c^2}}}}{\sqrt{1 + \frac{q^2}{c^2}}}\ , \tag{42}$$

wenn wir für die linearen Glieder q = D'/τ' und Y = D/τ einsetzen. Gleichung 42 stellt die Zeitmessung der bewegten Uhr dar, wenn diese b erreicht hat, mit welcher wir nun die Uhr am Punkt b einstellen können. Zur Vereinfachung der Schreibweise führen wir nun folgende Abkürzungen ein:

$$\alpha = \sqrt{1 + \frac{q^2}{c^2}} \quad \text{und} \quad \beta = \sqrt{1 - \frac{W^2}{c^2}}\ . \tag{43}$$

[129] Ives bemerkt dazu, daß dies auch eine recht übliche Meßmethode zur Geschwindigkeitsbestimmung ist. Diese wird zum Beispiel beim Autofahren verwendet oder von Zugreisenden, welche die vorbeiziehenden Telegraphenmasten zählen und das dazugehörige Zeitintervall durch eine Uhr in ihrer Hand bestimmen.

Da die Zeit, welche die Uhr bei a mißt, τ beträgt, benötigt die bewegte Uhr die Zeit $\tau\beta$, um b zu erreichen. Daher ist die Differenz Δ der Zeitanzeige der beiden Uhren gegeben durch

$$\Delta = \tau \cdot \beta - \frac{\tau \cdot \beta - \frac{W \cdot D}{c^2 \cdot \beta}}{\alpha} = \frac{\tau \cdot \beta \cdot (\alpha - 1) + \frac{W \cdot D}{c^2 \cdot \beta}}{\alpha} \quad . \tag{44}$$

Wenn wir annehmen, daß dieser Prozeß mit einer ganzen Reihe ruhender Uhren auf der Plattform durchgeführt würde, so hätten wir ein Feld mit Uhren, die alle mit der Frequenz $f_0 \cdot \beta$ schlagen, aber jede ist um einen Betrag zurückgesetzt, der eine Funktion des Abstandes, der Plattformgeschwindigkeit relativ zum Äther und des Meßstab-Uhr-Quotienten der bewegten Uhr ist.

Der Ausdruck für Δ kann noch weiter vereinfacht werden. Setzen wir in die Gleichung $\tau = D / Y = D' \beta / Y$ die Gleichung 41 für Y ein, so erhalten wir

$$\tau = \frac{D'\left(\alpha + \frac{q \cdot W}{c^2}\right)}{q \cdot \beta} \quad .$$

Diese Gleichung können wir in Gleichung 44 einsetzen und bekommen

$$\Delta = \frac{D'}{q}\left[(\alpha - 1) + \frac{W \cdot q}{c^2}\right] . \tag{45}$$

Jetzt suchen wir einen Ausdruck für die Geschwindigkeit V irgendeines Objektes, das sich gleichförmig in Bezug auf die Plattform bewegt, und dessen Laufzeit durch die bei a und b fixierten Uhren gemessen wird, wodurch V durch die Meßgrößen der Apparatur bestimmt werden kann. Da $V = \frac{D}{t}$ gilt, müssen wir nur D und t herausfinden. Für D haben wir $D = D' \cdot \beta$, wegen der FLL-Kontraktion. Die Zeit t erhalten wir durch die Zeitanzeige der Uhr im Punkt b, wenn der Körper diese erreicht und zur Zeitanzeige Null an der Uhr im Punkt a vorbeigekommen ist. Dies wird durch die Gleichung

$$t' = t \cdot \beta - \Delta \quad \text{bzw.} \quad t = \frac{t' + \Delta}{\beta}$$

verdeutlicht. Setzen wir nun Gleichung 45 für Δ und Q_2 für $\frac{D'}{t'}$ ein, so erhalten wir

$$V = \frac{Q_2 \cdot \beta^2}{1 + \frac{Q_2 W}{c^2} + \frac{Q_2}{q}(\alpha - 1)} . \qquad (46)$$

Diese Gleichung wird benötigt, um die Lichtgeschwindigkeit bestimmen zu können. In unserem betrachteten Fall ist die Lichtgeschwindigkeit in Bezug auf die Plattform durch c - W gegeben. Wenn wir dies für V in Gleichung 46 einsetzen, so erhalten wir für den Meßstab-Uhr-Quotienten

$$Q_2 = \frac{c}{1 - \frac{c}{q}(\alpha - 1)} . \qquad (47)$$

Dies ist einen Ergebnis, das unabhängig von der Geschwindigkeit W der Plattform ist. Dieses Resultat hätten wir als Lichtgeschwindigkeit c interpretiert, wenn wir bei der Messung die FLL-Kontraktion ignoriert hätten. Wir sehen aber, daß dieser Ausdruck nicht gleich c ist. Die Lichtgeschwindigkeit erhalten wir nun, indem wir Gleichung 47 nach c auflösen. Wir erhalten schließlich

$$c = \frac{2Q_2(Q_2 - q)}{2Q_2 - q} . \qquad (48)$$

Mit dieser Gleichung erhalten wir die Lichtgeschwindigkeit in einem Ein-Weg-Experiment mit zwei Uhren. Dabei treten nur noch Größen auf, die wir durch diese Meßapparatur bestimmen können. Diese Meßgrößen sind der Meßstab-Uhr-Quotient Q_2, der den Anzeigeunterschied der beiden fixierten Uhren enthält, wenn das Lichtsignal an beiden Uhren vorbeifliegt, und der Meßstab-Uhr-Quotient q der bewegten Uhr, die benutzt wurde, um die fixierten Uhren einzustellen.

Wiederum sehen wir, wie beim Experiment zuvor, daß wir die Geschwindigkeit des Lichtes in Bezug auf die Plattform $(c \pm W)$ nicht bestimmen können, dafür aber die Geschwindigkeit des Lichtes im Äther. Man beachte aber, daß sich Gleichung 48 für eine Uhr, die relativ zur Plattform sehr langsam bewegt wird, so daß $q \approx 0$ erfüllt ist, dem Wert $c = Q_2$ annähert.

8.3.4 Lorentz-Typ-Transformation und Relativitätsprinzip

Die FLL-Kontraktion hatte zur Folge, daß man die Plattformgeschwindigkeit W in beiden eben betrachteten Experimenten nicht bestimmen konnte. Wir bemerken, daß

das **Relativitätsprinzip** durch die aufgezeigten experimentellen Meßmethoden **nicht verletzt** wurde, obwohl bei der zweiten Methode mit zwei Uhren der Meßstab-Uhr-Quotient Q_2 die Lichtgeschwindigkeit c nicht direkt liefert. Das Relativitätsprinzip erfordert auch "nur", daß die Gesetze physikalischer Phänomene in jedem Inertialsystem die gleichen sind, und das ist hier der Fall. Für die Hin- und Rückweg-Methode mit einer Uhr erhält man in allen Inertialsystemen den Wert $Q_1 = c$, für die Ein-Weg-Methode mit zwei Uhren erhält man ebenso in allen Inertialsystemen den gleichen Wert $Q_2 = \frac{c}{1 - \frac{c}{q} \cdot (\alpha - 1)}$, sofern man dabei das Meßprinzip beibehält, d.h. q konstant läßt.

Für die Transformation von einem Inertialsystem A zu einem relativ dazu bewegten Inertialsystem B benötigt man wegen des Ergebnisses, daß im Allgemeinen $Q_2 \neq c$ ist, Transformationsgleichungen, welche die Meßstab-Uhr-Quotienten Q_2 und q enthalten. Ives hat 1949 diese Transformationsgleichungen berechnet und gezeigt, daß diese vom Lorentz-Typ sind. Um sich über die Transformationsgleichungen ein Bild machen zu können, sind die **Lorentz-Typ-Transformationen** hier wiedergegeben[130]:

$$X_2 = \frac{X_1 - \overline{V}\overline{T}}{\sqrt{1 - \frac{\overline{V}^2}{c^2}}},\ Y_2 = Y_1,\ Z_2 = Z_1,\ \overline{T}_2 = \frac{\overline{T}_1 - \frac{\overline{V}X_1}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{\overline{V}^2}{c^2}}} \qquad (49)$$

$$\text{mit } \overline{V} = \frac{d_1}{\chi_d + \frac{d_1}{q}(\alpha - 1)},\ \overline{T}_1 = \chi_1 + \frac{r_1}{q}(\alpha - 1),\ \overline{T}_2 = \chi_2 + \frac{r_2}{q}(\alpha - 1),$$

wobei X_2, Y_2, Z_2 die kartesischen Koordinaten eines Ereignisses im Inertialsystem B, X_1, Y_1, Z_1 die kartesischen Koordinaten eines Ereignisses im Inertialsystem A, $r_2 = \sqrt{X_2^2 + Y_2^2 + Z_2^2}$ und $r_1 = \sqrt{X_1^2 + Y_1^2 + Z_1^2}$ die Abstände zwischen Ereignisort und Koordinatenursprung darstellen. χ_i ist die Differenz der Uhranzeige am Anfang und am Ende der Trajektorie des Teilchens, q die selbstgemessene Bewegung der Uhr, die zum Ort des Ereignisses gebracht wird und c die Lichtgeschwindigkeit, die man über Q_1 erhält. Weiterhin ist d' die vom Ursprung der Plattform B abgelesene Position entlang der Plattform A. Da χ_d die dazugehörende abgelesene Zeit ist, entspricht der Quotient $\frac{d'}{\chi_d}$ dem gemessenen Meßstab-Uhr-Quotienten der einen Plattform in Bezug auf die andere (analog der mit q transportierten Uhr von oben).

Hieran sehen wir, daß bei unendlich langsamen Uhrentransport, wenn q = 0 erfüllt ist, die Lorentz-Typ-Transformation (Gleichung 49) mit der Lorentz-Transformation

130 Diese kann man finden in Ives, The FitzGerald Contraction, S. 9-26

übereinstimmt. Ives macht jedoch darauf aufmerksam, daß für den Fall q = 0 keine Meßoperation stattfinden kann, da man die Uhr zur Synchronisierung der Zeiteinstellung nicht bewegen würde.[131]

Falls q jedoch sehr klein ist, nähert sich die Lorentz-Typ-Transformation (Gleichung 49) der Lorentz-Transformation an. Damit ist die **Lorentz-Transformation eine praktische Näherung**, weil die Bewegung einer Uhr zur Zeiteinstellung meistens klein gegenüber der Lichtgeschwindigkeit c sein wird.

8.3.5 Zusammenfassung der Heliozentrischen Äthertheorie

Ives hält damit an der Unabhängigkeit von Raum und Zeit fest. Die FLL-Kontraktion des Raumes durch eine Geschwindigkeit gegenüber dem Äther ist für ihn real, die FLL-Kontraktion für die Zeit ist für ihn eine Folge der FLL-Kontraktion der Zeitmeßapparaturen, gilt deshalb nicht für die Zeit selbst. Zeit und Raum bleiben für Ives in Bezug auf den Äther absolut. Bei der Messung der Lichtgeschwindigkeit muß man zwischen einer Q_1- und einer Q_2-Messung unterscheiden. Dies führt dazu, daß man veränderte Transformationsgleichungen erhält, um von einem Inertialsystem zum anderen zu wechseln.

8.4 Folgerungen aus der Einsteinschen Relativitätstheorie

Nun werden wir Folgerungen und interessante Eigenschaften der **Einsteinschen Relativitätstheorie** von 1905 studieren. Dabei werden wir das Verhalten von Uhren in bewegten Systemen betrachten, die Eigenschaft der **Gleichzeitigkeit** untersuchen und einige Phänomene zur Lichtausbreitung in bewegten Systemen gemäß der Einsteinschen Relativitätstheorie kennenlernen.

Bei den Betrachtungen werden wir die Bewegungen in eine Richtungsachse eines Koordinatensystems legen und aus Gründen der Vereinfachung die Bewegungen weiterer Objekte in dieser Richtung betrachten. Damit lassen sich einige interessante Eigenschaften herleiten und zeigen. Zur besseren Veranschaulichung wählen wir die Darstellung in, von Arthur Otis benannten, **Raum-Zeit-Graphen** (im Englischen:

[131] Nachzulesen bei Ives, Lorentz-Type Transformations as Derived from Performable Rod and Clock Operations, S. 760

space-time graph). Die Darstellung im Raum-Zeit-Graphen erklärt sich fast von selbst (siehe Abbildung 22). Man sieht untereinander gereiht eine Abfolge von Zuständen in einer Bewegungsrichtung, womit man die Zeit vertikal und den "Raum" horizontal aufträgt.

Aus dem Relativitätsprinzip folgerte Einstein, wie wir schon gesehen haben, daß die Lichtgeschwindigkeit unabhängig von der Bewegung der Lichtquelle konstant ist. Dies bedeutet zum Beispiel für eine Lichtquelle in einem Zug, daß sich das Licht[132] in diesem System mit der Geschwindigkeit c ausbreitet, egal ob sich der Zug nun bewegt oder nicht. Abbildung 22 verdeutlicht diesen Sachverhalt.

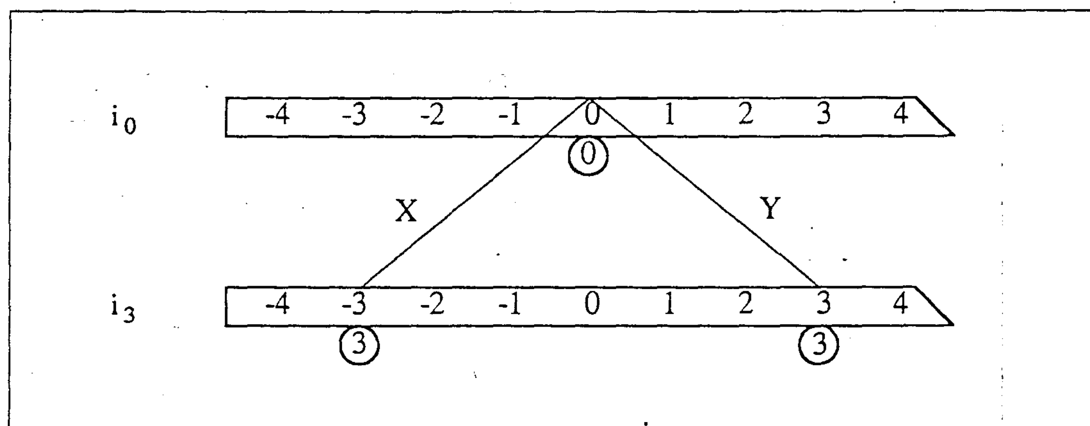


Abbildung 22 Raum-Zeit-Graphik eines fahrenden Zuges mit zwei sich ausbreitenden Lichtstrahlen, die von einer Quelle auf dem Zug ausgesendet werden[133]

In Abbildung 22 sind i_0 und i_3 zwei Augenblicke, die wir betrachten, die Zahlen in den Kreisen stellen die Ortszeit in Sekunden dar, d.h. hier die Zeit auf dem Zug. Die Zahlen im Zug sind die Ortskoordinaten des bewegten Systems. Die Bewegung des Zuges in Bezug auf einen Bahndamm haben wir nicht eingezeichnet, da dies gemäß des Relativitätsprinzips nicht nötig ist.

Anhand der Abbildung 22 sehen wir, daß zwei Lichtstrahlen, die zum Augenblick i_0 von einer Lichtquelle in der Mitte des Zuges starten, in gleichen Zeiten gleiche Entfernung zurücklegen. Im Augenblick i_3, an dem die Zuguhren 3 Sekunden anzeigen, haben daher die Lichtstrahlen die Orte -3 und +3 auf dem Zug erreicht (dabei messen wir in Zahleneinheiten von c, wobei c als Strecken- und Geschwindigkeitseinheit

[132] Zur Vereinfachung betrachten wir Licht als kurzen Lichtimpuls oder als Photon, wobei von einer Lichtquelle auch zwei Photonen gleichzeitig in entgegengesetzter Richtung davonfliegen können.

[133] Frei gezeichnet nach Otis, S. 52, Abb. 5-1

verwendet wird). Dies ist in Übereinstimmung mit der Einsteinschen Theorie und geschieht in einem Zug, der in irgendeiner Richtung mit einer beliebigen Geschwindigkeit kleiner c unterwegs ist.

8.4.1 Einsteinsches Relativitätsprinzip

Nun betrachten wir, welche Konsequenzen es hat, daß sich Licht in allen Inertialsystemen mit der Geschwindigkeit c ausbreitet. Nach Einstein bedeutet dies auch, daß ein bezüglich der Lichtquelle bewegter Beobachter stets die Lichtgeschwindigkeit c zu 299792458 m/s messen wird. Dieses bezeichnen wir als **Einsteinsches Relativitätsprinzip**. Dazu betrachten wir Abbildung 23.

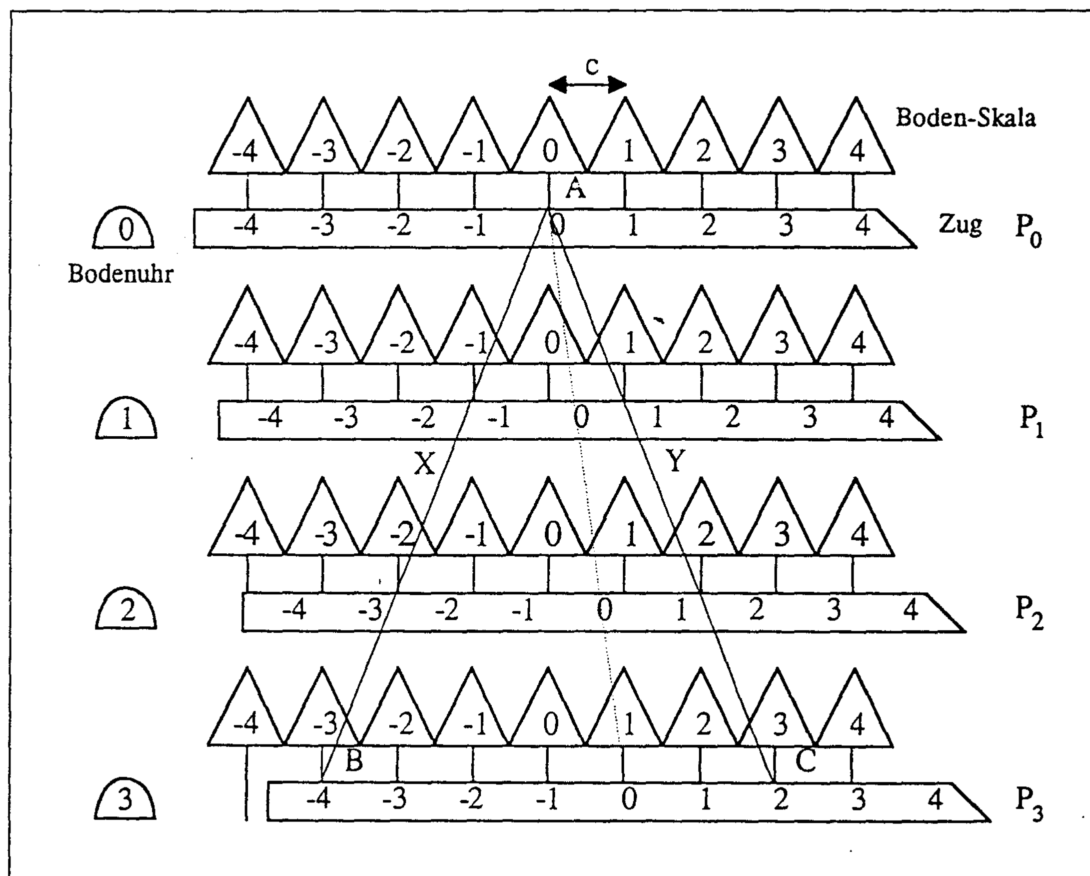


Abbildung 23 Raum-Zeit-Graphik eines sich relativ zum Boden bewegenden Zuges und eine relativ zum Boden ruhende Lichtquelle bei A[134]

Auf der linken Seite sehen wir die Zeit, die für das Bodensystem vergeht, die Baumreihe stellt eine Längenskalierung dar, ebenso die Zahlen im Zug (die Längenkontraktion haben wir zur Vereinfachung hier noch weggelassen, da die eigentliche

[134] Frei gezeichnet nach Otis, S. 14, Abb. 3-1

Eigenschaft, die wir betrachten wollen, auch so deutlich werden kann). Der Zug bewegt sich mit einer Geschwindigkeit von $v = \frac{c}{3}$ nach rechts.

Nun betrachten wir, wie ein Beobachter auf dem Zug die Lichtgeschwindigkeit mißt und dabei den Wert c erhält. Zunächst sehen wir, daß die Lichtstrahlen der relativ zum Boden ruhenden Quelle im Augenblick 0 ausgesendet werden und beide nach drei Sekunden die Bäume bei -3 und +3 erreicht haben. Somit repräsentiert die Raum-Zeit-Linie AB den Lichtstrahl X und die Raum-Zeit-Linie AC den Lichtstrahl Y, welche beide mit der Lichtgeschwindigkeit c bezüglich des Bodens unterwegs sind. Nun betrachten wir einen Beobachter im Zug, der am Ort 0 des Zuges mitfährt. Wir sehen in Abbildung 23, daß im Augenblick 3 der Lichtstrahl X den Baum -3 erreicht und auch die Zugmarke -4 dort vorbeikommt. Dies bedeutet, daß im Augenblick 3 der Lichtstrahl vom Beobachter im Zug vier Einheiten entfernt ist. Weiter sehen wir, daß im Augenblick 3 der Lichtstrahl Y gerade die Zugmarke 2 erreicht, womit der Lichtstrahl Y vom Beobachter nur zwei Einheiten entfernt ist.

Nun scheint es klar zu sein, daß der Beobachter in diesem Fall die Geschwindigkeit des Lichtstrahls X als $\frac{4}{3}c$ und die Geschwindigkeit des Lichtstrahls Y als $\frac{2}{3}c$ bestimmen wird. Gemäß dem **Einsteinschen Relativitätsprinzip** jedoch wird der Beobachter auf dem Zug für beide Lichtstrahlen X und Y eine Geschwindigkeit von c, d.h. drei Einheiten in drei Sekunden, ermitteln und somit die gleiche Geschwindigkeit auf dem Zug wie auf dem Boden erhalten. Dieses **Verständnis des Relativitätsprinzips** wird sehr oft mit dem **Nulleffekt des Michelson-Morley-Interferometer-Experiments begründet**, da der Nulleffekt eine Folge der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit sei. Die Interpretation des Relativitätsprinzips **sieht Otis** jedoch ganz **anders**, er schreibt:

"*Zunächst müssen wir bedenken, daß wir, weil die Lichtquelle des Michelson-Morley-Experimentes im Laboratorium in Ruhe war, aus diesem Experiment nichts für Lichtstrahlgeschwindigkeiten relativ zur Erde schließen können, wenn die Lichtquelle nicht in Ruhe relativ zur Erde ist. Ist es nicht daher ein mißverstandener Denkschluß anzunehmen, daß aus dem Michelson-Morley-Experiment folgt, daß die Geschwindigkeit* ***aller*** *Lichtstrahlen gleich sein muß relativ zur Erde, ob die Quelle der Lichtstrahlen auf der Erde in Ruhe ist oder nicht?*"[135]

[135] "First, we must remember that since in the Michelson-Morley experiment the source of light was at rest in the laboratory, we cannot conclude from that experiment anything regarding the velocity of beams relative to the earth when the beams have their source not at rest relative to the earth. Is it not mistaken reasoning, therefore, to assume that it follows from the Michelson-Morley experiment that the velocities of *all* beams must be the same relative to the earth whether the-

Damit sieht Otis die obige Folgerung nicht als logische Konsequenz aus dem experimentellen Ergebnis des Michelson-Morley-Interferenz-Versuchs. Seiner Meinung nach ist die Folgerung aus dem Experiment, daß die Lichtgeschwindigkeit konstant ist, ein Ergebnis mißverstandener Begründung. Dazu betrachtet Otis die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit aus dem Blickfeld des Relativitätsprinzips und stellt fest:

> *"Gemäß dem Einsteinschen Postulat, daß die Naturgesetze in allen Inertialsystemen gleich sind, folgt es, daß Lichtstrahlen von einer* ***Quelle auf dem Boden*** *Geschwindigkeiten haben werden, welche* ***relativ zum Boden gleich*** *sind, ... während Lichtstrahlen von einer* ***Quelle auf dem Zug*** *Geschwindigkeiten haben werden, die* ***relativ zum Zug gleich*** *sind. ... Der Fehler, den Einstein anscheinend gemacht hat, besteht darin zu denken, daß vom obigen Postulat ebenso folgen muß, daß Lichtstrahlen von einer* ***Quelle auf dem Boden*** *Geschwindigkeiten haben müssen, die* ***relativ zum Zug gleich*** *sind. Dies letztere Verständnis folgt jedoch nicht zwingend aus dem Postulat der Uniformität der Naturgesetze."*[136]

Dieses kann man sich an einem Beispiel verdeutlichen. Wenn wir auf dem Boden still stehen und einen Ball fallen lassen, so wird dieser geradlinig auf den Boden fallen. Wir wissen auch, daß dies so bleibt, wenn wir in einem gleichförmig fahrenden Zug still stehen und dann einen Ball fallen lassen, so fällt dieser auch dort geradlinig zu Boden. Diese Eigenschaft der physikalischen Experimente hat zu der Überzeugung geführt, daß die physikalischen Gesetze in allen Inertialsystemen gleich sind. Diese Beobachtung kann aber nicht zu dem Schluß führen, daß ein Ball, der von einer auf dem Boden stehenden Person fallengelassen wird, relativ zum Zug eine geradlinige Bewegung beschreibt.

Auf Grund dieser Erkenntnis kann man annehmen, daß Lichtstrahlen von einer ruhenden Quelle am Boden Geschwindigkeiten haben, die auch gleich groß sind relativ zum Zug, ebenso wie man annimmt, daß ein von einer auf dem Boden stehenden Person fallengelassener Ball geradlinig relativ zum Zug herabfällt.[137] Damit war es in erster Linie nicht nötig zu fordern, daß die Lichtgeschwindigkeit konstant ist (im wörtlichen Sinne). Außerdem wird diese Auffassung durch die Untersuchungen von

se beams have their source at rest on the earth or not?" Otis, S. 15, Hervorhebungen im Original

136 "According to Einstein's postulate that the laws of nature are the same in all inertial systems it follows that beams from a *source on the ground* would have velocities that are *equal relative to the ground* ... ; whereas beams from a *source on the train* would have velocities that are *equal relative to the train* .... The mistake Einstein appears have made is in thinking from the above postulate it must follow also that beams from a *source on the ground* must have velocities that are *equal relative to the train*. This latter concept just doesn't follow at all from the postulate of the uniform laws of nature." Otis, S. 16, Hervorhebungen im Original

137 Diese Meinung vertritt insbesondere Otis, S. 16

Ives unterstützt, da man theoretisch verschiedene relative Lichtgeschwindigkeiten zulassen kann, ohne daß diese zugleich meßbar sein müssen.

8.4.2 Bewegte Lichtquellen, Züge und Uhren

Nun betrachten wir einige Folgerungen der Auffassung Einsteins von der **Konstanz der Lichtgeschwindigkeit** in allen Inertialsystemen. Der Unterschied zur Theorie von Ives besteht im Zulassen relativer Geschwindigkeiten des Lichts, die von der relativen Geschwindigkeit des Beobachters abhängt. Die Geschwindigkeit des Beobachters ist nicht meßbar, da die relative Bewegung zum Äther bei allen Meßmethoden herausfällt. Zunächst behandeln wir die Lorentztransformation für Raum und Zeit. Für die Beschränkung auf eine Bewegungsrichtung erhalten wir[138] als Transformation für den Ort x und die Zeit t im Inertialsystem S zum Ort x' und der Zeit t' im Inertialsystem S':

(LT 1) $$x' = k \cdot (x - v \cdot t)$$

(LT 2) $$t' = k \cdot \left(t - \frac{v \cdot x}{c^2}\right)$$

wobei v die Relativgeschwindigkeit von S' zu S und $k = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}}$ ist[139]. Daraus folgt, daß bewegte Objekte einer Längenkontraktion (Verkürzung) unterliegen und die Zeit in bewegten Systemen langsamer voranschreitet. Diese sogenannte **Zeitdilatation** gilt dabei **für alle Abläufe**, daher auch für chemische und organische Prozesse. Nach der Einsteinschen Theorie schreitet die Zeit in einem bewegten System tatsächlich langsamer voran, im **Gegensatz zur Vorstellung von Ives**, der diese **Zeitdilatation** nur der **Zeitmessung einer Uhr** zuschreibt.[140]

Mit dieser Vorbereitung betrachten wir zwei auf parallel liegenden Schienen entgegenkommende Züge, wie in der Abbildung 24 dargestellt. In jeden Zug kann dabei ein Inertialsystem gelegt werden, da beide Züge eine gleichförmige, geradlinige Bewegung beschreiben.

---

138 Eine Herleitung der Lorentztransformation kann man nachlesen in Fliessbach, S. 24 ff

139 Wir bezeichnen den Faktor hier mit k und nicht mit γ, um auf den prinzipiellen Unterschied aufmerksam zu machen: in γ steht die Geschwindigkeit v für die Bewegung relativ zum Äther, in k steht v für die relative Bewegung der Inertialsysteme zueinander.

140 Dies hebt Otis hervor in Otis, S. 41

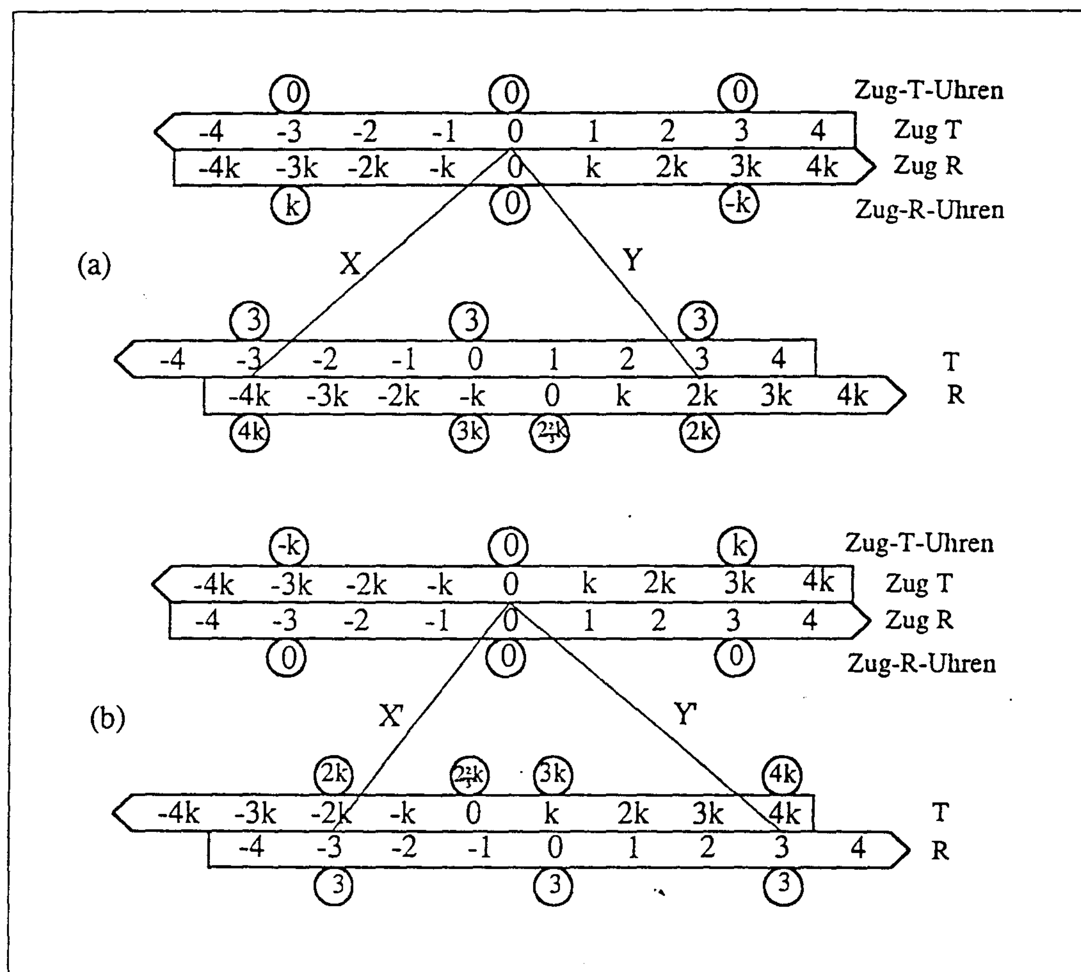


Abbildung 24 Raum-Zeit-Graphik zweier sich begegnender Züge, in Graphik (a) ruht eine Lichtquelle auf dem Zug T, in Graphik (b) eine Lichtquelle auf dem Zug R[141]

Graphik (a) der Abbildung 24 zeigt die Bewegung zweier Lichtstrahlen X und Y, die gleichzeitig von einer Quelle bei A emittiert werden, welche im Koordinatenursprung des Zuges T ruht. Gemäß des Einsteinschen Postulats der konstanten Lichtgeschwindigkeit bewegen sich die Lichtstrahlen X und Y eine Einheit pro Sekunde relativ zum Zug T und erreichen nach drei Sekunden die Markierungen -3 und +3 auf diesem Zug, welche mit B und D bezeichnet sind. Dabei nehmen wir an, daß die Zuggeschwindigkeit $v = \frac{1}{3}c$ ist.

Nun wenden wir Gleichung (LT 1) an und erhalten für den Zug R die Markierungen -4k und 2k am Punkt B bzw. D. Anwendung der Gleichung (LT 2) führt zur Uhrzeit 4k und 2k am Punkt B bzw. D. Damit bewegt sich Lichtstrahl X von A nach B und legt 4k Einheiten in 4k Sekunden zurück, oder eine Einheit pro Sekunde relativ

[141] Frei gezeichnet nach Otis, S. 53, Abb. 5-2

zum Zug. Analoges gilt für Lichtstrahl Y von A nach D, der 2k Einheiten = 2k Sekunden zurücklegt, d.h. eine Einheit pro Sekunde relativ zum Zug.

Andererseits können wir annehmen, daß sich eine Lichtquelle auf dem Zug R befindet und Lichtstrahlen X' und Y' emittiert, wie in der Graphik (b) gezeigt. Wir nehmen an, die Uhren des Zuges R laufen synchron und die Lichtstrahlen X' und Y' von der Quelle in A auf dem Zug R legen in drei Sekunden drei Einheiten zurück und sind danach an den Punkten E (-3) und G (+3) des Zuges R. Nun wenden wir die Gleichungen (LT 1) und (LT 2) an, um vom Zug R auf den Zug T zu transformieren und erhalten im Zug T für E und G die Markierungen -2k und 4k und die dazu korrespondierenden Zeiten 2k und 4k. Damit bewegen sich die Lichtstrahlen eine Einheit pro Sekunde relativ zum Zug T.

Nun betrachten wir einen problematisches Gedankenexperiment, bei dem sich auf jedem Zug eine Lichtquelle befindet. Damit nun die Geschwindigkeiten der Lichtstrahlen X und Y relativ zum Zug gleich sind, muß man im Rahmen der Theorie annehmen, daß die Uhren in Zug T während jeder relativen Stellung der beiden Züge zueinander synchron laufen, während die Uhren in Zug R alle verschiedene Zeiten anzeigen, wie in Abbildung 24 der Graphik (a) zu sehen ist. Umgekehrt, um die Geschwindigkeiten der Lichtstrahlen X' und Y' als gleich relativ zum Zug T zu bekommen, muß man im Rahmen der Theorie annehmen, daß die Uhren in Zug R alle die gleiche Zeit anzeigen und die Uhren in Zug T alle eine verschiedene Zeit anzeigen, wie in Abbildung 24 der Graphik (b) gezeigt ist.

Das bedeutet, wenn sich zwei aneinander vorbeifahrende Züge mit je einer Lichtquelle in irgendeiner relativen Position zueinander befinden, muß man im Rahmen der Theorie annehmen, daß auf jedem Zug die Uhren sowohl alle die gleiche Zeit, als auch eine von den anderen verschiedene Zeit anzeigen! Dies ist jedoch nicht möglich.

Diese **Unmöglichkeit** versucht man oft durch eine **"Erscheinen"-Interpretation** aufzulösen. Bei dieser Interpretation wird angenommen, daß die Uhranzeigen 4k, 3k, 2k usw. in der Abbildung 24 der Graphik (a) für die Zug-R-Uhren und in der Graphik (b) für die Zug-T-Uhren nicht wirkliche Uhranzeigen sind (Anzeigen, die ein Beobachter in beiden Fällen erhält, wenn er bei der Uhr steht), sondern diese Uhranzeigen für einen Beobachter auf dem anderen Zug nur als solche erscheinen. Daher sind die

Uhranzeige auf beiden Zügen stets synchron. Dies würde bedeuten, daß im Falle des Zuges R in der Abbildung 24 der Graphik (a) die tatsächlichen Uhranzeigen für einen Beobachter im Zug R nicht 4k, 3k, und 2k sind, so wie dies dargestellt ist.

Welche Konsequenzen hat aber nun diese "Erscheinen"-Interpretation? Mit dieser Interpretation müßten wir nun annehmen, daß der Beobachter für alle Uhren eine gleiche Zeitanzeige erhält, anstelle der Anzeigen 4k, 3k, und 2k. Nehmen wir einmal an, er erhält 3k für alle drei Uhren. Damit würde der Beobachter auf dem Zug R nun die Geschwindigkeit des Lichtstrahles X relativ zum Zug R als 4k Einheiten in drei Sekunden bestimmen und analog die Geschwindigkeit des Lichtstrahles Y relativ zum Zug als 2k Einheiten in 3k Sekunden. Damit erhält der Beobachter jedoch ungleiche Geschwindigkeiten für beide Lichtstrahlen. Dies steht jedoch im **Widerspruch zur Einsteinschen Theorie**![142]

Wir erkennen also, wenn wir nicht gemäß der Theorie annehmen, daß ein Beobachter auf dem Zug R in diesem Fall ungleiche Zeitanzeigen erhält (siehe Abbildung 24 der Graphik (a)), dann wird dieser auch keine gleichen Geschwindigkeiten für die Lichtstrahlen X und Y relativ zu seinem Zug erhalten. Dadurch **bleibt** aber die oben erwähnte **"Unmöglichkeit" erhalten**.

Diese **"Unmöglichkeit"** wird noch deutlicher, wenn man annimmt, daß die beiden Züge an einer Plattform zwischen ihnen vorbeifahren. Diesmal bewegen sich die Züge relativ zur stationären Plattform. Dazu betrachten wir die Abbildung 25.

[142] Dies kann man nachlesen in Otis, S. 54-55

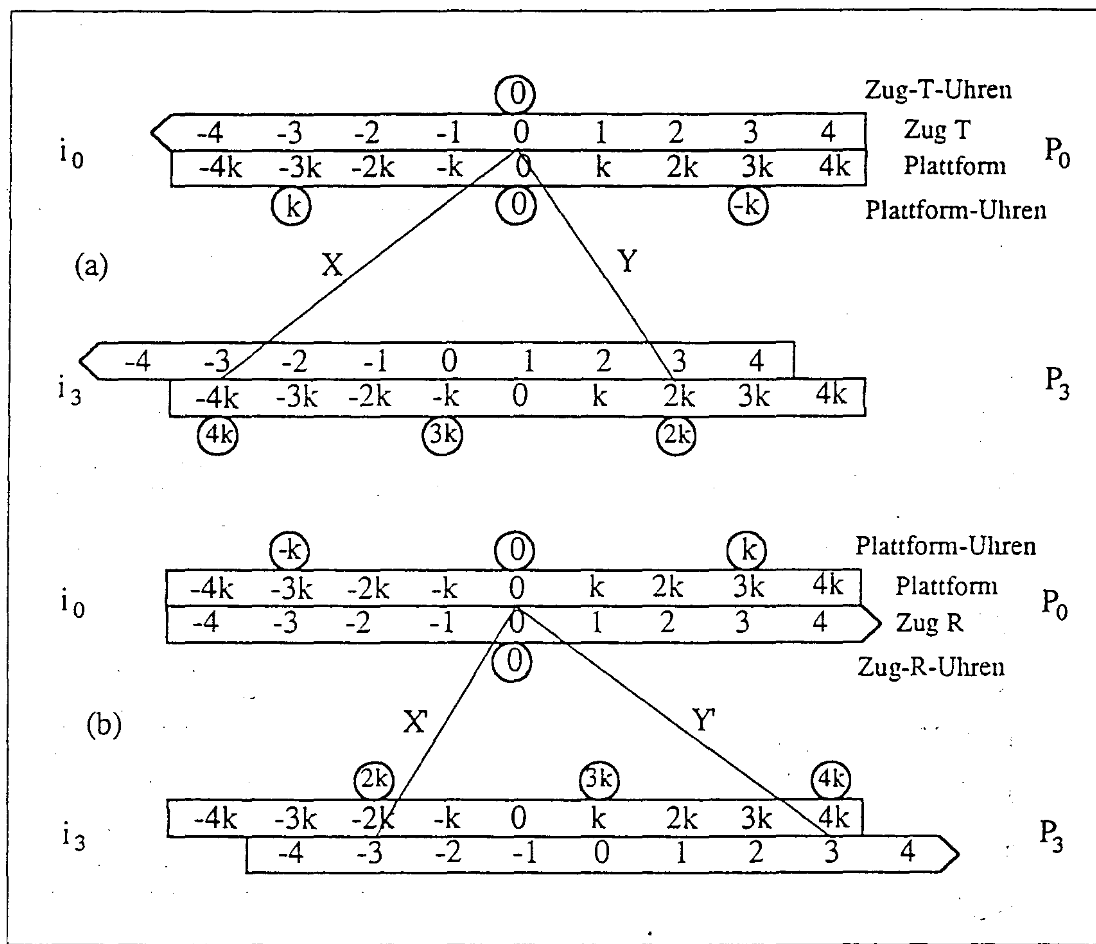


Abbildung 25 Raum-Zeit-Graphik zweier sich begegnender Züge, die an einer Plattform vorbeikommen, in Graphik (a) bewegt sich der Zug nach links, in Graphik (b) bewegt sich der Zug nach rechts, in beiden Fällen ist der Zug das Bezugssystem[143]

Wir sehen, daß sich der Zug T in der Graphik (a) nach links und der Zug R in der Graphik (b) nach rechts bewegt. Zum Augenblick i_0 werden die Lichtstrahlen X und Y von der Quelle im Ursprung des Zuges T und die Lichtstrahlen X' und Y' von der Quelle im Ursprung des Zuges R emittiert. Damit nun die Geschwindigkeiten der Lichtstrahlen X und Y relativ zur Plattform gleich sind, nimmt man im Rahmen der Theorie an, daß sich die Skaleneinheiten auf der Plattform in Bezug auf den Zug wie abgebildet ergeben; k Einheiten auf der Plattform entsprechen eine Einheit auf dem Zug und die Uhren auf der Plattform zeigen unterschiedliche Zeiten an (wir betrachten den Zug als ruhend und die Plattform relativ dazu bewegt). Wir sehen damit in der Raum-Zeit-Graphik (Abbildung 25), daß jede Uhr eine spätere Zeit anzeigt als die Uhr rechts daneben. Dies gewährleistet wiederum, daß ein Beobachter auf der Plattform die Lichtgeschwindigkeit als 4k Einheiten in 4k Sekunden für den Lichtstrahl X und

[143] Frei gezeichnet nach Otis, S. 98, Abb. S-4

2k Einheiten in 2k Sekunden für Lichtstrahl Y erhält (eine Einheit pro Sekunde). Andererseits, um für die Geschwindigkeit der Lichtstrahlen X' und Y' relativ zur Plattform den gleichen Wert zu erhalten, muß man im Rahmen der Theorie annehmen, daß k Einheiten auf der Plattform einer Einheit auf dem Zug R entsprechen und daß die Plattformuhren alle unterschiedliche Zeiten anzeigen, wenn sich der Zug R in irgendeiner relativen Position zur Plattform befindet. Diesmal jedoch zeigt jede Uhr eine spätere Zeit wie die Uhr links daneben an, wie man in der Abbildung 25 der Graphik (b) sehen kann. Auch dies gewährleistet, daß ein Beobachter auf der Plattform eine Lichtgeschwindigkeit von einer Einheit pro Sekunde für beide Lichtstrahlen X' und Y' erhält.

Dies bedeutet nun aber - um für die Geschwindigkeiten der Lichtstrahlen X und Y relativ zur Plattform den gleichen Wert zu erhalten und zur selben Zeit für die Geschwindigkeit der Lichtstrahlen X' und Y' relativ zur Plattform den gleichen Wert zu bekommen - daß die Plattformuhren ungleiche Zeiten anzeigen, wie in der Abbildung 25 der Graphik (a) dargestellt, und die Zeitanzeige nach links hin zunimmt, aber zur gleichen Zeit ungleiche Zeiten anzeigen, wie in der Abbildung 25 der Graphik (b) gezeigt, und die Zeitanzeige nach rechts zunimmt. Offensichtlich können die Plattformuhren jedoch nicht gleichzeitig nach beiden Richtungen zu- und abnehmen[144]. Damit hat sich die **"Unmöglichkeit" erhärtet**, die sich aus der Theorie ergibt.

8.4.3 Seltsame oder intelligente Uhren

Jetzt betrachten wir den Fall, daß unter gewissen Umstände die **Uhren** sogar **rückwärts gehen**. Dazu benötigen wir folgende Gleichung:

$$t' = \frac{t}{k} - \frac{vx'}{c^2} \qquad (50)$$

die man aus den Gleichungen (LT 1) und (LT 2) herleiten kann. In Übereinstimmung mit der Theorie wissen wir, daß Uhren in einem ruhenden Zug alle die gleiche Zeit anzeigen. Nun nehmen wir an, daß ein Zug sich in dem Augenblick in Bewegung setzt, an dem die Boden-Uhren und die Zuguhren 0 anzeigen. Wir nehmen weiter an, daß

[144] Dies kann man nachlesen bei Otis, S. 98-99

der Zug sehr rasch eine Geschwindigkeit von $\frac{2}{3}c$ erreicht. Wenn der Zug nun diese Geschwindigkeit hat, dann hat k den Wert

$$k = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{4}{9}}} \approx 1,34 \approx \frac{4}{3}\ .$$

Nun berechnen wir aus Gleichung 50 die Zeitanzeige t' an verschiedenen Punkten entlang des Zuges im Augenblick $t = \frac{4}{3}$ (damit $\frac{t}{k} = 1$). Es sei weiterhin c = 1.

Für die Punkte x' entlang des Zuges erhalten wir mittels obiger Gleichung die dazugehörigen Zeitanzeigen an diesen Orten, die man in Abbildung 26 in der zweiten Reihe der Kreise ablesen kann.

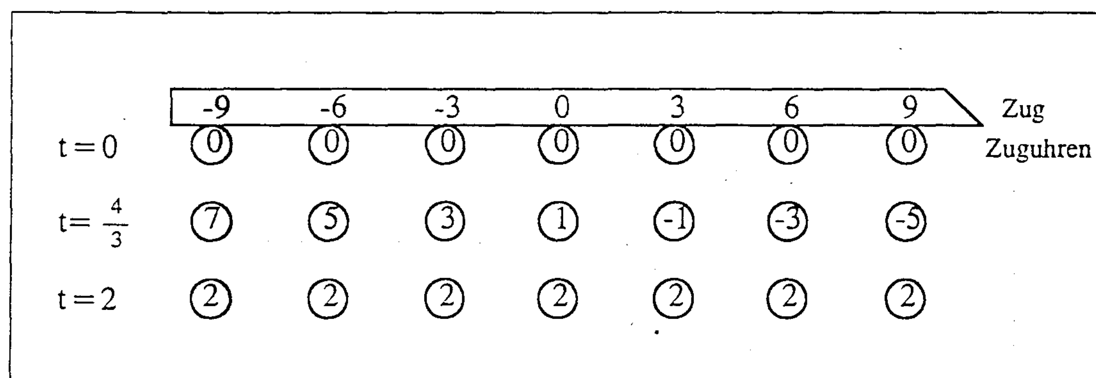


Abbildung 26 Raum-Zeit-Graphik eines Zuges, der zunächst ruht, dann zu einer Geschwindigkeit beschleunigt und danach wieder zum Ruhezustand abgebremst wird. Die Anzeigen der Zuguhren sind eingezeichnet[145]

Man kann zeigen, daß für eine Zuguhr, die sich zwischen dem Ursprung des Zugsystems und des Bodensystems befindet, zu jedem Moment diese Zuguhr mit der Bodenuhr übereinstimmt. Nimmt man an, der Zug hält genau dann, wenn die Zuguhr zwischen Zug-Ursprung und dem Boden-Ursprung 2 anzeigt. In diesem Moment erwarten wir, daß **alle** anderen Zuguhren ebenso 2 anzeigen, so wie dies in der dritten Reihe der Abbildung 26 zu sehen ist. Theoretisch gibt es für ein Inertialsystem keine Begrenzung, somit könnten wir die Zeitanzeigen der zweiten Reihe von minus Unendlich bis plus Unendlich fortsetzen.

Damit sehen wir, daß die **Zuguhren** an den Orten 3, 6 und 9 zwischen t = 0 und $t = \frac{4}{3}$ während dieses Intervalls **zurückgegangen** sein müssen. Analog erkennen wir,

[145] Frei gezeichnet nach Otis, S. 41, Abb. 4-4

daß die Zuguhren an den Orten -3, -6 und -9 in der Zeit zwischen $t = \frac{4}{3}$ und t = 2 zurückgegangen sein müssen, um die Zeit 2 zum Zeitpunkt t = 2 anzuzeigen.

Eine Beschleunigung oder Verzögerung eines Zuges bringt einige Zuguhren zum **Rückwärtslaufen**. Damit läuft gemäß der Einsteinschen Relativitätstheorie die Zeit zurück! Newton würde dies für unrealistisch halten und alle, die eine Zeitvorstellung im Sinne der Newtonschen Mechanik haben, weil nach Mach "*allein der Verlauf der absoluten Zeit nicht geändert werden kann.*"[146]

Dieses seltsame Verhalten der Uhren wird durch einen weiteren Umstand erschwert. Da die Zeitanzeige zusätzlich von der Wahl des Ursprunges abhängt, erscheinen gemäß der Einsteinschen Theorie die **Uhren mit Intelligenz** ausgestattet zu sein. Dazu betrachten wir die Abbildung 27.

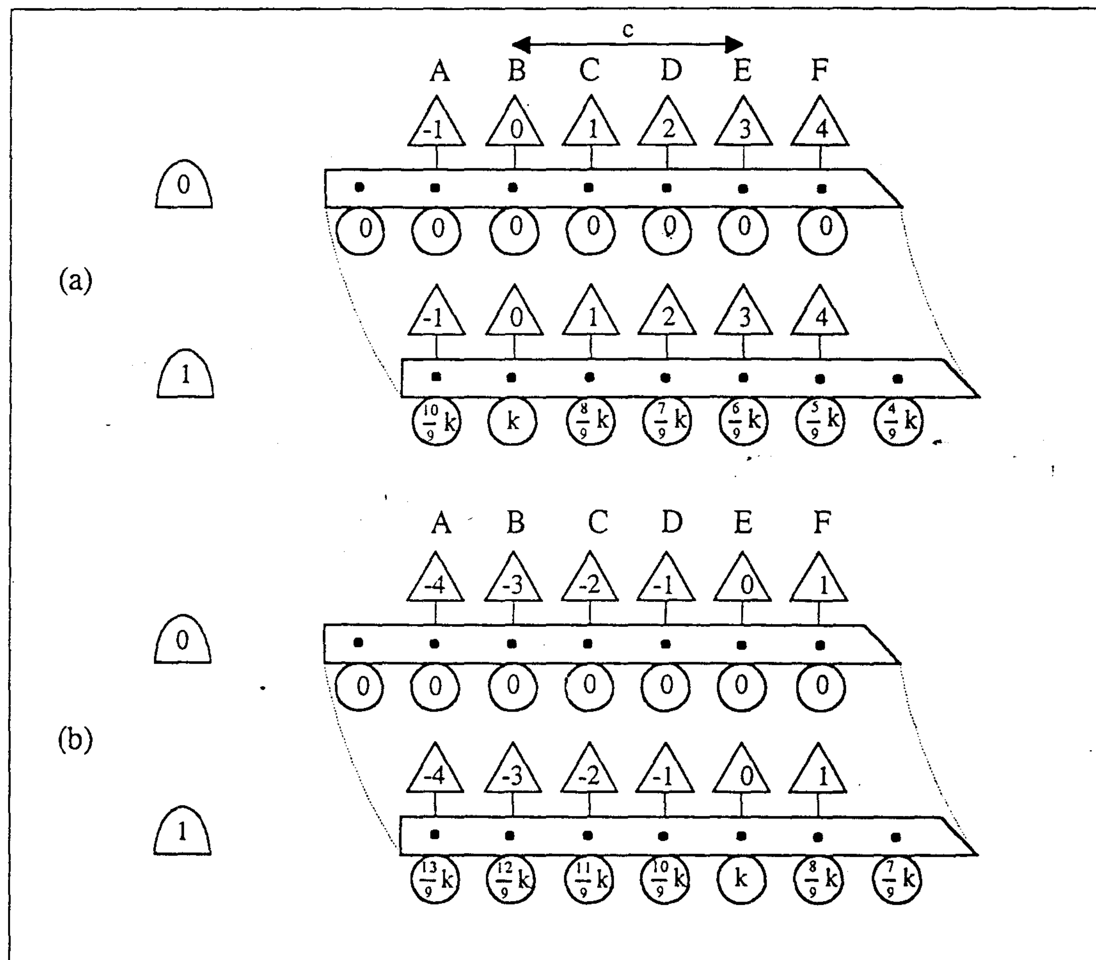


Abbildung 27 Das Verhalten von beschleunigten Zuguhren bei unterschiedlicher Wahl des Koordinatenursprungs des Bodensystems. In Graphik (a) ist Baum B, in Graphik (b) der Baum E der Koordinatenursprung[147]

[146] Mach, S. 216

[147] Frei gezeichnet nach Otis, S. 43, Abb. 4-5

Wir sehen in beiden Graphiken (a) und (b) einen Zug, der im Augenblick 0 gegenüber einer Reihe von Bäumen A, B, C, D und F ruht. Jede Graphik zeigt einen Zug, der sich im Augenblick 0 in Bewegung setzt. Im Augenblick 0 stimmen die Zuguhren noch mit den Bodenuhren überein. Zum Zeitpunkt 1 wird wie zum Zeitpunkt 0 jener Zug gezeigt, der jedoch nun eine angenommene Geschwindigkeit von $\frac{c}{3}$ und eine Strecke von $\frac{c}{3}$ vom ursprünglichen Ort zurückgelegt hat (als habe er die Geschwindigkeit sofort nach dem Start gehabt). Wir wissen nun aber, daß die **Wahl eines Koordinatenursprungs** in irgendeinem Inertialsystem **frei getroffen** werden kann. Somit haben wir in der Graphik (a) der Abbildung 27 den Baum B als Ursprung des Bodensystems gewählt. Die Graphik zeigt die Werte der Berechnungen gemäß der Transformationsgleichungen (LT 1) und (LT 2) für die Zuguhren zum Augenblick 1. Die Zuguhr zeigt gegenüber des Baumes B die Zeit k an, die anderen Zuguhranzeigen kann man in der Graphik ersehen.

Wir erhalten etwas anderes, wenn wir Baum E als Ursprung für das Bodensystem wählen, wie man in Graphik (b) sehen kann. Zum Augenblick 1 zeigt die Zuguhr gegenüber Baum E die Zeit k an, die Zuguhr gegenüber Baum B jedoch $\frac{12}{9}k$ anstelle von k.

Damit stellt sich die Frage, wie die Zuguhr gegenüber Baum B wissen kann, welchen Ort wir als Ursprung oder Beobachtungsort gewählt haben, um zum Augenblick 1 die Zeit k oder $\frac{12}{9}k$ anzuzeigen, und analog für die anderen Zuguhren. Es erscheint nun notwendig, die **Uhren mit Intelligenz** auszustatten, was in der Realität nicht möglich ist.

8.4.4 Gleichzeitig oder nacheinander?

Nach den Eigenheiten der Uhren (**intelligente** und **rückwärtsgehende Uhren**) im vorherigen Kapitel werden wir nun die **Gleichzeitigkeit von Ereignissen** oder eine **Abfolge von Ereignissen in Bezug auf bewegte Systeme** betrachten.

Bevor wir Abbildung 28 betrachten, gehen wir darauf ein, wie wir aus den Transformationsgleichungen (LT 1) und (LT 2) die Längenangaben und Uhrzeitanzeigen an den verschiedenen Orten im bewegten Zug erhalten haben. Im Falle des Punktes H in Abbildung 27 zum Beispiel ist der Wert x (Ortsangabe bezüglich des Bodens) gleich

$2\frac{1}{2}$ Einheiten. Der Wert t (Zeitanzeige bezüglich des Bodens) ist gleich $1\frac{1}{2}$. In dieser Abbildung ist c eine Einheit pro Sekunde und v gleich $\frac{1}{3}$ Einheiten pro Sekunde. Damit erhalten wir für den Punkt H

$$x' = k \cdot (x - v \cdot t) = k \cdot \left(2\tfrac{1}{2} - \left(\tfrac{1}{3} \cdot 1\tfrac{1}{2}\right)\right) = 2 \cdot k$$

und $$t' = k \cdot \left(t - \frac{v \cdot x}{c^2}\right) = k \cdot \left(1\tfrac{1}{2} - \left(\tfrac{1}{3} \cdot 2\tfrac{1}{2}\right)/1^2\right) = \tfrac{2}{3} \cdot k\,.$$

Das Ergebnis ist im Kreis bei dem Punkt H dargestellt. Ähnliche Rechnungen würden zeigen, daß alle gezeigten Zuglängenangaben und Zugzeitanzeigen in Übereinstimmung mit den Transformationsgleichungen (LT 1) und (LT 2) sind. Den Faktor k benötigen wir für die jetzigen Betrachtungen eigentlich nicht, eine kurze Rechnung ergibt für $k = \sqrt{\frac{9}{8}}$, da in diesem Fall $\frac{v}{c} = \frac{1}{3}$ gewählt wurde.

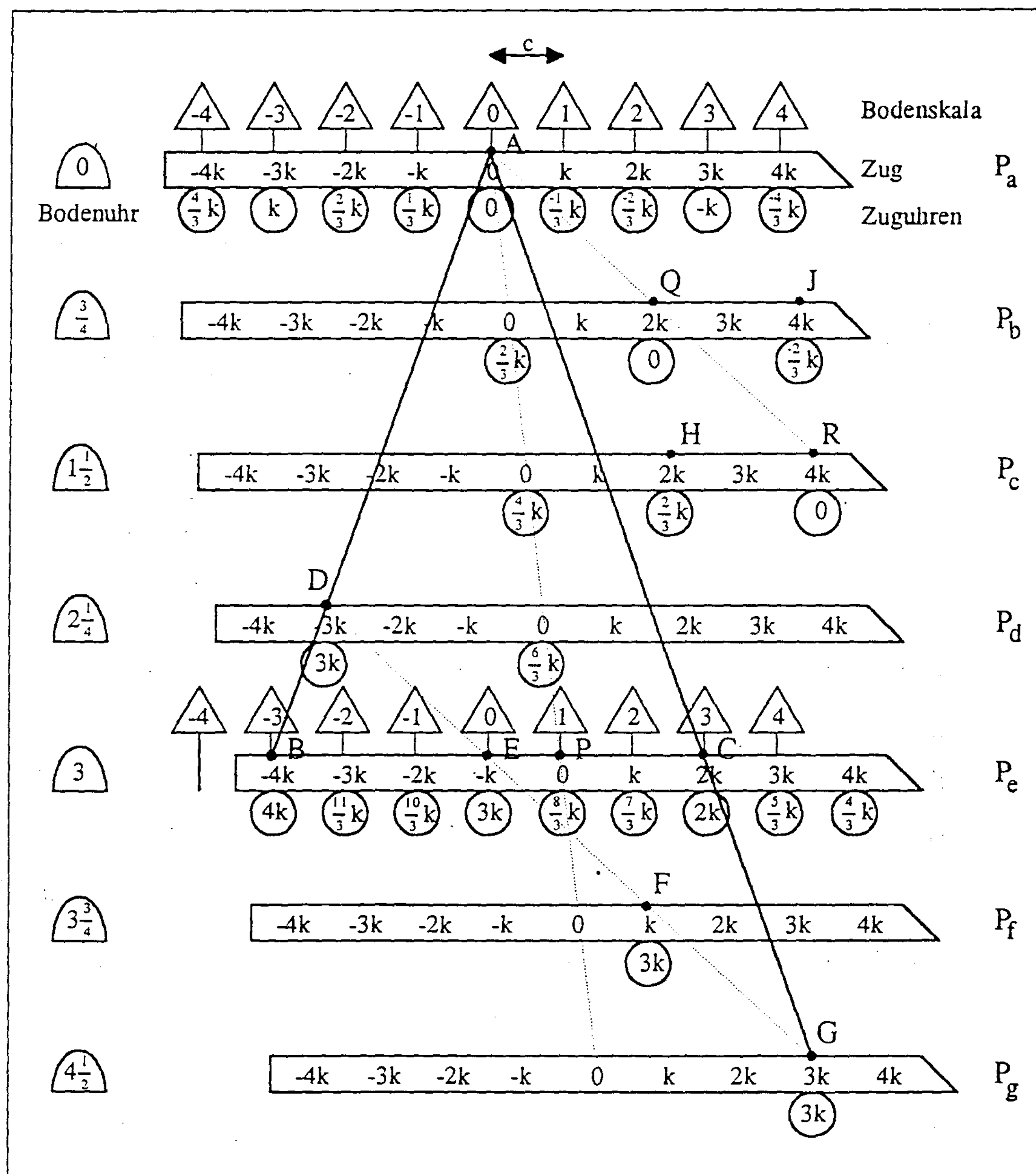


Abbildung 28 Raum-Zeit-Graphik eines relativ zum Boden bewegten Zuges und eine Lichtquelle, die bei A relativ zum Boden ruht und Lichtstrahlen aussendet[148]

Aus der Abbildung 28 können wir nun einige Folgerungen herauslesen. Dazu betrachten wir zunächst folgende Punkte:

(1) Wenn die Bodenuhr $2\frac{1}{4}$ anzeigt, so ist die Zeit auf dem Zug durch 3k am Ort -3k gegeben.

(2) Wenn die Bodenuhr 3 anzeigt, so ist die Zeit auf dem Zug durch 3k am Ort -k gegeben.

[148] Frei gezeichnet nach Otis, S. 33, Abb. 4-1

(3) Wenn die Bodenuhr $3\frac{3}{4}$ anzeigt, so ist die Zeit auf dem Zug durch 3k am Ort +k gegeben.

(4) Wenn die Bodenuhr $4\frac{1}{2}$ anzeigt, so ist die Zeit auf dem Zug durch 3k am Ort +3k gegeben.

Die Zuguhr am Punkt D zeigt an, daß der Lichtstrahl X, der von einer ruhenden Quelle am Punkt A ausgesandt wurde, die Entfernung von 3k Einheiten in 3k Sekunden zurückgelegt und damit eine Geschwindigkeit von einer Einheit pro Sekunde (also c) hat. Analoges gilt für die Zuguhr am Punkt G des Zugortes +3k. Wir sehen nun die Zeit gemäß der Einsteinschen Relativitätstheorie in einem vorwärts bewegten Zug nach vorne über den Zug streichen.

Repräsentieren die Punkte D, E, F und G jeweils ein Ereignis, so erscheinen diese Ereignisse bezüglich des Zuges gleichzeitig, obwohl diese bezüglich des Bodens in Folge erscheinen. Andererseits sind die Ereignisse B, E und C gleichzeitig bezüglich des Bodens und nacheinander bezüglich des Zuges, da die Uhren unterschiedliche Zeiten anzeigen.

Diese Tatsache veranlaßte Einstein zu erklären: Ereignisse, die gleichzeitig am Boden geschehen, erfolgen nicht gleichzeitig auf einem bewegten Zug und umgekehrt. Damit war **Einstein** genötigt, den **Begriff der Gleichzeitigkeit neu** zu **definieren**, da die Gleichzeitigkeit nur noch einen Sinn im Zusammenhang mit der Angabe des Bezugssystems ergibt.[149]

Wir können die Eigenschaft der Gleichzeitigkeit der Ereignisse D, E, F und G bezüglich des Zuges noch durch zusätzliche Ereignisse erweitern. Liegen auf der Linie DG nach vorne und hinten noch weitere Ereignisse, so können diese bezüglich des Bodens theoretisch von der unbegrenzten Vergangenheit bis zur Ewigkeit in der Zukunft reichen. Auf dieser Linie sind die Ereignisse D, E, F und G nur ein Teilausschnitt dieser Ereignislinie. Somit können wir nun unter gewissen Umständen gemäß der Einsteinschen Relativitätstheorie diese unbegrenzte Ereignis-Serie als einen einzigen Augenblick betrachten. Damit schrumpft die **"Ewigkeit" zu** einem einzigen **"Augenblick"** zusammen, die **Dynamik** der Ereignisse ist **verschwunden**.

[149] Dies kann man nachlesen in Otis, S. 27

Nun gehen wir noch einen Schritt weiter und zeigen, Ereignisse, die in Bezug auf ein Inertialsystem in der Reihenfolge A-B erscheinen, können in Bezug auf ein anderes Inertialsystem gemäß der Einsteinschen Relativitätstheorie in der Reihenfolge B-A erscheinen. Wir betrachten dazu wiederum Abbildung 28 und wählen den Punkt A als ein Ereignis zum Zeitpunkt 0 bezüglich des Bodens und den Punkt J als ein weiteres Ereignis zum Zeitpunkt $\frac{3}{4}$ bezüglich des Bodens. Aus diesem Grund erscheinen bezüglich des Bodens diese Ereignisse in der Reihenfolge A-J. Betrachten wir jedoch die Zuguhren, die gemäß der Gleichung (LT 2) berechnet werden können, so findet das Ereignis J zum Zeitpunkt $-\frac{2}{3}k$ bezüglich des Zuges statt. Deswegen erscheint das Ereignis J vor dem Ereignis A mit dem Zeitpunkt 0 bezüglich des Zuges. Somit wird gemäß der Einsteinschen Relativitätstheorie möglich, daß Ereignisse, die in der Reihenfolge A-B bezüglich einem Inertialsystem stattfinden, hingegen in der Reihenfolge B-A bezüglich eines anderen Inertialsystems erfolgen können. Auch hier können wir wiederum die Linie AJ nach vorne und hinten verlängern und somit eine Ereignislinie J, K, L, M, N usw. in Bezug auf ein Inertialsystem erhalten (Boden), hingegen eine umgekehrte Reihenfolge N, M, L, K, J usw. in Bezug auf ein anderes Inertialsystem (Zug).

Damit wird die **chronologische Abfolge** zweier Zeitangaben **abhängig vom Bezugssystem**, d.h. zum Beispiel die Menschheitsgeschichte kann durch geeignete Wahl eines Bezugssystems umgekehrt werden. Bei der Wahl eines speziellen Bezugsystems kann eine zeitliche Abfolge auf einen Augenblick projiziert werden, wodurch **dynamische Prozesse eingefroren** werden.

8.4.5 Zusammenfassung der Einsteinschen Relativitätstheorie

Alle diese Folgerungen - Unmöglichkeit der unterschiedlichen Zeitanzeige, **intelligente** und **rückwärtsgehende** Uhren, **Umkehrung** oder **Einfrieren** von **Sequenzen** und **Neudefinition der Gleichzeitigkeit** - ergeben sich allein aus dem Einsteinschen Postulat, daß die **Lichtgeschwindigkeit** c für jeden Beobachter in einem beliebigen Inertialsystem **konstant** ist, wobei die Lichtquelle bewegt sein kann oder nicht. Dieses Postulat hatte Einstein als Folgerung aus dem Relativitätsprinzip verstanden, wobei man, wie wir weiter oben gesehen haben, eine andere Meinung vertreten kann.

9 Zusammenfassung der Ergebnisse

Wir haben gesehen, daß es im Einklang mit dem Newtonschen Relativitätsprinzips **kein physikalisches Kriterium** aus der Sicht der Mechanik **für** oder **gegen Geozentrismus oder Heliozentrismus** geben kann.

Das Studium einiger wesentlicher Experimente führte unausweichlich zu nichtmechanischen Kriterien, wobei die Frage nach dem Weltbild nunmehr durch die Frage nach der Lichtausbreitung abgelöst wurde. Die **Theorien zur Lichtausbreitung** sind **nicht unabhängig vom betrachteten Weltbild**. Somit können wir daraus kein physikalisches Kriterium für oder gegen Geozentrismus oder Heliozentrismus ableiten. Dieses steht im Einklang mit dem Relativitätsprinzip.

Ein Studium der Heliozentrischen Äthertheorie führte zum Ergebnis: man kann die experimentellen Ergebnisse unter Beibehaltung des Bezugssystems Äther erklären und es folgt daraus **kein Widerspruch zum Relativitätsprinzip** - im Gegensatz zur Einsteinschen Auffassung.

Die kritische Betrachtung einiger Folgerungen aus der **Einsteinschen Relativitätstheorie** offenbarte einige Schwierigkeiten oder Unmöglichkeiten, welche eine breite Bestätigung durch die Experimente auf Grund logischer Inkonsistenzen innerhalb der Theorie in Frage stellen muß. Wenn man daher weiter an dieser Theorie festhält, muß man sich dieser **Problematik stellen**.

Letztlich müssen wir **beide Weltbilder** als **mögliche Beschreibung** und Grundlage zur Erklärung von Experimenten zulassen, da wir auf Grund der Experimente kein Entscheidungskriterium erhalten haben.

Solange die **Natur des Lichtes** noch **verborgen** bleibt, **können** wir die **Frage nach dem richtigen Weltbild** physikalisch **nicht beantworten**. Es bleibt die Tatsache, die Mach so treffend ausdrückte, indem er sagte, "*daß das Weltsystem uns nur einmal gegeben ist, die ptolemäische* (also geozentrische) *oder kopernikanische* (also heliozentrische) *Auffassung aber unsere Interpretationen, aber beide gleich wirklich sind.*"[150]

[150] Mach, S. 222, Hervorhebung im Original

Dies entspricht auch der Einsteinschen Auffassung, der konstatierte, daß Theorien "*freie Erfindungen des menschlichen Geistes*"[151] sind.

[151] Bernstein, S. 24

10 Literaturverzeichnis

1) Airy, George Biddell. "On a supposed alteration in the amount of Astronomical Aberration of Light, produced by the passage of the Light through a considerable thickness of Refracting Medium", **Proceedings of the Royal Society of London** (Vol. 20, Nov. 23, 1871), S. 35-39

2) Aspden, Harold. "Physics without Einstein" (Southampton: Sabberton Publications, 1969)

3) Baker, Adolph. "Modern Physics and Antiphysics" (Reading, Menlo Park, London, Amsterdam, Don Mills, Sydney: Addison-Wesley Publishing Company, 1972, 2. Auflage)

4) Bernstein, Jeremy. "Albert Einstein" (München: Deutscher Taschenbuch Verlag, 1975), aus dem Englischen übertragen von Julia Kindl

5) Birch, P. "Is the Universe rotating?", **Nature** (Vol. 298, July 29, 1982), S. 451-454

6) Breuer, Hans. "dtv-Atlas zur Physik", Band 2, Elektrizität, Magnetismus, Festkörper, Moderne Physik (München: Deutscher Taschenbuch Verlag, 1988)

7) Callatay, Vincent de, Andonin Dollfus. "Goldmanns Atlas der Planeten" (München: Wilhelm Goldmann Verlag, 1969)

8) Einstein, Albert. "Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie" (Braunschweig, Druck und Verlag von Friedr. Vieweg & Sohn, 1917)

9) Falk, Ruppel. "Mechanik, Relativität, Gravitation" (Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1983)

10) Fliessbach, Torsten. "Allgemeine Relativitätstheorie" (Mannheim, Wien, Zürich: BI-Wissenschaftsverlag, 1990)

11) Gerthsen, Christian, Hans O. Kneser und Helmut Vogel. "Physik" (Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: Springer-Verlag, 1986, 15. Auflage)

12) Giancoli, Douglas C. "Physics: principles with applications" (Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, Inc., 1985, 2. Auflage)

13) Harré, Rom. "Great Scientific Experiments: Twenty Experiments that Changed our View of the World" (Oxford, New York: Oxford University Press, 1984, Reprint)

14) Hecht, Eugen. "Optik" (Bonn, München, Reading, Menlo Park, New York, Don Mills, Wokingham, Amsterdam, Sydney, Singapore, Tokyo, Madrid, San Juan: Addison-Wesley, 1989, 1. unveränderter Nachdruck 1991), aus dem Englischen übertragen von Fritz Siemsen

15) Hewitt, Paul G. "Conceptual physics" (Glenview, Boston, London: Scott, Foresman and Company, 1989, 6. Auflage)

16) Holton, Gerald und Stephen G. Brush. "Introduction to Concepts and Theories in Physical Science" (Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1985, 2. Auflage)

17) Hoyle, Fred. "Astronomy and Cosmology: A modern course" (San Francisco: W. H. Freemann and Company, 1975)

18) Hyman, Andrew T. "The Mathematical Relationship Between Kepler's Laws and Newton's Laws", **Amer. Math. Monthly** (Vol. 111, December, 1993), S. 932-936

19) Ives, Herbert Eugene. "Genesis of the Query 'Is There an Ether?'", **Journal of the Optical Society of America** (Vol. 43, Nr. 3, March, 1953), S. 217-218, in Turner, Dean und Richard Hazelett. "The Einstein Myth and the Ives Papers: A Counter-Revolution in Physics" (Old Greenwich, Connecticut: The Devin-Adair Company, Publishers, 1979), S. 188-190

20) Ives, Herbert Eugene. "Light Signals Sent Around a Closed Path", **Journal of the Optical Society of America** (Vol. 28, August, 1938), S. 296-299, auch in Turner, Dean und Richard Hazelett. "The Einstein Myth and the Ives Papers: A Counter-Revolution in Physics" (Old Greenwich, Connecticut: The Devin-Adair Company, Publishers, 1979), S. 41-44

21) Ives, Herbert Eugene. "Lorentz-Type Transformations as Derived from Performable Rod and Clock Operations", **Journal of the Optical Society of America** (Vol. 39, Nr. 9, September, 1949), S. 757-761, in Turner, Dean und Richard Hazelett. "The Einstein Myth and the Ives Papers: A Counter-Revolution in Physics" (Old Greenwich, Connecticut: The Devin-Adair Company, Publishers, 1979), S. 142-146

22) Ives, Herbert Eugene. "The FitzGerald Contraction", **Scientific Proceedings of the Royal Dublin Society**, new series (Vol. 26, Nr. 1, 1952), S. 9-26, in Turner, Dean und Richard Hazelett. "The Einstein Myth and the Ives Papers: A Counter-Revolution in Physics" (Old Grennwich, Connecticut: The Devin-Adair Company, Publishers, 1979), S. 163-181

23) Ives, Herbert Eugene. "The Measurement of the Velocity of Light by Signals Sent in One Direction", **Journal of the Optical Society of America** (Vol. 38, Nr. 10, October, 1948), S. 879-884, in Turner, Dean und Richard Hazelett. "The Einstein Myth and the Ives Papers: A Counter-Revolution in Physics" (Old Greenwich, Connecticut: The Devin-Adair Company, Publishers, 1979), S. 136-141

24) Jaffe, Bernard. "Michelson and The Speed of Light" (Westport, Connecticut: Greenwood Press, Publishers, 1979, Reprint)

25) Kennedy, Roy J. und Edward M. Thorndike. "Experimental Establishment of the Relativity of Time", **Physical Review** (Vol. 42, November 1, 1932)

26) Laplace, Marquis Pierre. "Essai philosophique sur les probabilités" (1814), in Bernstein, Jeremy. "Albert Einstein" (München: Deutscher Taschenbuch Verlag, 1975), S. 33

27) Livingston, Dorothy Michelson. "The Master of Light: A Biography of Albert A. Michelson" (Chicago, London: The University of Chicago Press, 1973)

28) Lorentz, Hendrik Antoon, Albert Einstein und Hermann Minkowski. "Das Relativitätsprinzip" (Leipzig, Berlin: Druck und Verlag von B. G. Teubner, 1913)

29) Mach, Ernst. "Die Mechanik: Historisch-kritisch dargestellt" (Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 1982, unveränderte reprographischer Nachdruck der 9. Auflage, Leipzig 1933)

30) Michelson, Albert A. "Lichtwellen und ihre Anwendungen" (Leipzig: Verlag von Johann Ambrosius Barth, 1911), aus dem Englischen übersetzt und durch Zusätze erweitert von Max Iklé

31) Michelson, Albert A. "The relative motion of the Earth and the Luminiferous ether", **American Journal of Science** (Vol. 22, August, 1881), S, 120-129

32) Michelson, Albert A. und Henry G. Gale. "The Effect of the Earth's Rotation on the Velocity of Light, Part II" **The Astrophysical Journal** (Vol. 61, 1925), S. 140-145, auch in Turner, Dean und Richard Hazelett. "The Einstein Myth and the Ives Papers: A Counter-Revolution in Physics" (Old Greenwich, Connecticut: The Devin-Adair Company, Publishers, 1979), S. 256-261

33) Michelson, Albert A. und E. W. Morley. "Influence of Motion of the Medium on the Velocity of Light", **Sill. Journ.** (Vol. 31, Nr. 3, 1886), S. 377, in Livingston, Dorothy Michelson. "The Master of Light: A Biography of Albert A. Michelson" (Chicago, London: The University of Chicago Press, 1973), S. 111

34) Neugebauer, Otto. "The Conflict Thesis and Cosmology" (The Open University, 1979)

35) Nolting, Wolfgang. "Grundkurs: Theoretische Physik", Band 1, Klassische Mechanik (Ulmen: Verlag Zimmermann-Neufang, 1989)

36) Otis, Arthur S. "Light Velocity and Relativity" (New York: Christian E. Burkel and Associates, Yonkers-On-Hudson, 1963, 3. Auflage)

37) Pólya, George. "Mathematical Methods in Science" (The Mathematical Association of America, 1977)

38) Rutherford, F. James, Gerald Holton und Fletcher G. Watson. "Project Physics: Text and Handbook", Band 2, Motion in the Heavens (New York, Toronto: Holt, Rinehart and Winston, Inc., 1975)

39) Stewart, Albert B. "The Discovery of Stellar Aberration", **Scientific American** (March, 1964), S. 100-108

40) Solovyov, Yury. "The universe discovered", **Quantum** (May/June, 1992), S. 12-18

41) Thirring, Hans. "Über die Wirkung rotierender ferner Massen in der Einsteinschen Gravitationstheorie", **Physikalische Zeitschrift** (Vol. 19, Nr. 3, 1. Februar, 1918), S. 33-39

42) Turner, Dean und Richard Hazelett. "The Einstein Myth and the Ives Papers: A Counter-Revolution in Physics" (Old Greenwich, Connecticut: The Devin-Adair Company, Publishers, 1979)

43) Whittaker, Sir Edmund. "A History of the Theories of Aether and Electricity", Band 1, The Classical Theories (London, Edinburgh, Paris, Melbourne, Toronto, New York: Thomas Nelson and Sons Ltd., 1951, revidierte und ergänzte Auflage, Erstauflage 1910)